

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

PAR
Bernard WENGA NTCHEPING

ÉTUDE DE LA DILUTION DES AÉROSOLS DE NaCl ET DU GAZ TRACEUR CO₂ :
APPLICATION À L'ÉCHANTILLONNAGE DES POUSSIÈRES
DE POLISSAGE DES GRANITES

MONTREAL, LE 7 AOÛT 2014

©Tous droits réservés, Bernard Wenga Ntchepping, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor Songmene, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ali Bahloul, codirecteur de mémoire
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

M. Robert Hausler, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Stephane Hallé, membre du jury
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Demers, membre du jury
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 JUILLET 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout travail de recherche est le fruit d'une collaboration avec des personnes ressources. À ce titre, mes remerciements s'adressent:

Au Pr. Victor Songmene et au Dr. Ali Bahloul, pour leur encadrement;

Au Dr. Jules Kouam et au Dr. René Kamguem, pour leurs conseils;

Au personnel de l'IRSST, notamment la directrice de l'équipe « Prévention des risques chimiques et biologiques », Mme Diane Hamelin Bourassa pour m'avoir accueilli au laboratoire à l'IRSST, le Dr. Abdelhakim Djebara, pour son soutien à mon travail à l'IRSST;

À la Direction de AL Granit Inc., pour les informations techniques liées aux travaux de recherche;

À mon feu papa Roger Ntcheping Wenga, ma tendre épouse Elvine Josiane Makuaze et mon fils Samuel Ntcheping, pour leur soutien moral et affectif au cours de ces trois années consacrées à la recherche.

ÉTUDE DE LA DILUTION DES AÉROSOLS DE NaCl ET DU GAZ TRACEUR CO₂ : APPLICATION À L'ÉCHANTILLONNAGE DES POUSSIÈRES DE POLISSAGE DES GRANITES

Bernard WENGA NTCHEPING

RÉSUMÉ

L'utilisation des aérosols de NaCl ou du gaz traceur (CO₂) est une routine scientifique pour étudier le comportement aéraulique de la poussière et la performance des équipements filtrants tout en préservant la santé et la sécurité des personnes. Il permet de comprendre l'émission, la dispersion et la dilution des particules émises par les procédés industriels et réduire ainsi les coûts des mesures de terrain. La présente recherche porte sur un diluteur cylindrique à volume constant afin d'identifier le facteur de dilution applicable pour l'échantillonnage à fortes concentrations de poussières. Une génération contrôlée des aérosols de NaCl et du gaz traceur CO₂ permet d'étudier la dilution de ceux-ci et de déterminer le facteur de dilution maximal. Le résultat est appliqué au polissage à bande de deux nuances de granites (10% de silice, 50% de silice). Les résultats montrent que le facteur de dilution maximal est largement influencé par le débit d'injection de l'air propre et le débit d'injection du polluant (aérosols NaCl ou gaz traceur CO₂). Cela a permis de reconstituer le spectre des concentrations détérioré initialement par le débordement du calibre dues aux fortes concentrations qui dépassaient la valeur limite de l'appareil qui est de 400 mg /m³. L'application du facteur de dilution de 5 à l'échantillonnage des poussières PM2.5 a permis d'une part, d'observer un fonctionnement normal du photomètre DUSTTRAK et de différencier nettement le niveau d'émission du granite «blanc» et du granite «noir», d'autre part. Ainsi les poussières «totales» du granite «blanc» s'élèvent à environ 60,000 mg/m³ alors que celles du granite «noir» s'élèvent à environ 40,000 mg/m³ dans les mêmes conditions de polissage et d'échantillonnage. Ce qui n'était pas le cas pour l'échantillonnage sans dilution. Ces deux indicateurs du niveau de pollution combinés aux proportions en silice des deux matériaux montrent que, l'exposition de l'ouvrier pourrait passer du simple au double lorsqu'on varie la nuance de granite en atelier de polissage. Ce qui nous amène à recommander des moyens de captation très performants pour le granite «blanc».

Mots clés: Granite, silice, PM2.5, NaCl, CO₂, échantillonnage, dilution.

STUDY OF NaCl AEROSOL AND CO₂ TRACER GAS DILUTION: APPLICATION TO DUST SAMPLING DURING GRANITE POLISHING

Bernard WENGA NTCHEPING

ABSTRACT

The use of sodium chloride aerosols (NaCl) or tracer gas (CO₂) is a laboratory routine for the general study of aerosol behavior, ventilation dust, and filters performance while preserving the health and safety of persons. It is used to analyse the emission, the dispersion and the dilution of particles emitted during industrial processes and to reduce the high costs associated to field measurements. In this case, the present research focuses on a cylindrical diluter (with constant volume) which use controlled NaCl aerosols and tracer gas CO₂ to identify the maximum dilution factor for sampling high concentrations. The study show that the maximum dilution factor is 5 for the diluter used and this parameter is applied to dust sampling during the polishing tape of two granite samples contain 10% and 50% silica, The maximum dilution factor is largely influenced by clean air injection flow and the polluted air injection flow. The applied dilution factor allowed us to reconstruct the primitive concentrations spectrums which is initially damaged by the overflow reading during high dust concentrations (over 400 mg/m³). The maximum dilution factor 5 applied to PM2.5 dust sampling allowed the normal operation of DUSTTRAK photometer and clearly differentiate emission level between "white" granite and "black" granite. In that case, the "total" dust of "white" granite are approximately 60,000 mg/m³ while those of "black" granite are approximately 40,000 mg/m³ under the same polishing conditions and sampling. This was not the case for dust sampling without dilution. These two level indicators combined with silica proportions of the two materials pollution show that the exposure of the worker could spend doubled when varying the shade of granite polishing workshop. This leads us to recommend extremely efficient means to capture the "white" granite dust.

Keywords: Granite, silica, PM2.5, NaCl, CO₂, sampling, dilution.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Matériau de granite et le procédé de polissage	5
1.1.1 Matériau «granite»	5
1.1.1.1 Les variétés de granites et la composition minéralogique	6
1.1.1.2 Les propriétés et la microstructure des granites	8
1.1.2 Le polissage et les émissions de poussières	9
1.1.2.1 Description physique du processus de polissage	9
1.1.2.2 L'émission des poussières au cours de l'usinage et du polissage	11
1.1.2.3 Les méthodes de polissage, les abrasifs et les machines-outils ..	12
1.1.3 Échantillonnage des poussières d'usinage et de polissage	16
1.1.3.1 L'échantillonnage direct et l'échantillonnage indirect	17
1.1.3.2 L'échantillonnage des poussières d'usinage de Songmene et al (2008)	17
1.2 La dilution des poussières au cours de l'échantillonnage des poussières	19
1.2.1 Le modèle de facteur de dilution de Giechaskiel (2009 a, b)	20
1.2.1.1 Les hypothèses et les équations générales de dilution	20
1.2.1.2 Le modèle de facteur de dilution de Giechaskiel, (2009b)	21
1.2.2 Le modèle de facteur de dilution de Collins (2010)	22
1.2.2.1 Les hypothèses et les équations générales de dilution des particules	22
1.2.2.2 Le facteur de dilution numérique pour des pertes négligées.....	24
1.2.2.3 Le facteur de dilution volumique ou le facteur de dilution «débit»	24
1.2.2.4 Le facteur de dilution numérique avec des pertes de particules non négligeables	25
1.2.2.5 La pénétration d'un aérosol avec des pertes non négligeables ..	25
1.2.3 Les types de diluteurs.....	26
1.2.3.1 Le diluteur à résidence	27
1.2.3.2 Le diluteur à injection	27
1.2.3.3 Le diluteur à filtres	28
1.2.3.4 Le diluteur à rotor	29
1.2.3.5 Le diluteur à volume constant et l'étude comparative des diluteurs	36
1.3 Conclusion partielle	39

CHAPITRE 2 DILUTION DES AÉROSOLS NaCl ET DU GAZ TRACEUR CO ₂	41
2.1 Dispositif expérimental de dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO ₂	41
2.1.1 Dispositif expérimental de la dilution des aérosols NaCl	42
2.1.1.1 Le générateur d'aérosols	42
2.1.1.2 Le tube à gel de silice	42
2.1.1.3 Le diluteur	44
2.1.1.4 Le débitmètre massique TSI série 4100 et les rotamètres	44
2.1.1.5 Le Scanning Mobility Particle Sizer «SMPS #3080»	47
2.1.2 Dispositif expérimental de dilution du gaz traceur CO ₂	49
2.1.2.1 La bonbonne de stockage du gaz traceur CO ₂ sous pression	49
2.1.2.2 L'analyseur de gaz LFG20	49
2.2 Méthodes	52
2.2.1 Méthodes de Giechaskiel, (2009a) et de Collins (2010)	52
2.2.1.1 Le facteur de dilution «débit massique»	52
2.2.1.2 Le facteur de dilution «débit volumique»	53
2.2.1.3 Le facteur de dilution théorique	53
2.2.1.4 Le facteur de dilution «concentration massique»	53
2.2.1.5 Le facteur de dilution «concentration volumique»	55
2.2.1.6 Le facteur de dilution «concentration numérique» avec des pertes d'aérosols non négligeables	55
2.2.1.7 Le facteur de dilution théorique «concentration»	56
2.2.1.8 Le taux de variation de la concentration diluée	57
2.2.2 Méthodes des plans d'expériences	58
2.2.2.1 Le plan expérimental de dilution des aérosols NaCl	58
2.2.2.2 le plan expérimental de dilution du gaz traceur CO ₂	58
2.2.2.3 L'estimation des concentrations brutes émises avant la dilution	58
2.3 Comportement de la dilution des aérosols de NaCl	59
2.3.1 Les modèles de dilution	59
2.3.1.1 Le modèle homographique de la concentration diluée	59
2.3.1.2 Le modèle exponentiel de la concentration diluée	60
2.3.1.3 Le modèle exponentiel du facteur de dilution	61
2.3.2 L'influence des paramètres de dilution sur la concentration diluée et le facteur de dilution	61
2.3.2.1 L'influence du débit de l'«air propre» injecté	61
2.3.2.2 L'influence de la pression d'émulsion de la solution NaCl	65
2.3.2.3 L'influence de la concentration de la solution NaCl	66
2.3.3 Comportement du spectre des concentrations au cours de la dilution	69
2.3.3.1 Comportement du spectre brut des concentrations numériques	69
2.3.3.2 Comportement du spectre final des aérosols après dilution	71
2.4 Comportement de la dilution du gaz traceur CO ₂	75
2.4.1 L'influence des paramètres de dilution	75
2.4.1.1 Le comportement du taux de variation de la concentration diluée	75
2.4.1.2 L'influence du débit de l'air «propre» sur le facteur de dilution	75

2.4.1.3	L'influence du débit d'injection de CO ₂ sur le facteur de dilution	76
2.4.2	Modèles de régression pour le facteur de dilution du CO ₂	85
2.4.2.1	Modèles de régression pour les débits d'injection de gaz carbonique de 0.6, 0.8, et 1 LPM et les débits d'air «propre» de 0 à 3 LPM	85
2.4.2.2	Modèles de régression aux débits d'injection de gaz carbonique de 0.6, 0.8, et 1 LPM pour les débits d'air «propre» faibles (0 à 1.2 LPM).....	86
2.4.3	Comparaison de la dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO ₂	90
2.5	Conclusion partielle	92
CHAPITRE 3 APPLICATION À L'ÉMISSION DES POUSSIÈRES PM _{2.5}		93
3.1	Matériel et méthodes.....	93
3.1.1	Matériel des essais de polissage et d'échantillonnage des poussières	94
3.1.1.1	La polisseuse, la table dynamométrique et l'échantillon de granite	94
3.1.1.2	Le profilomètre Mitutoyo® SJ-400	94
3.1.1.3	Le photomètre DUSTTRAK.....	96
3.1.1.4	Le diluteur, le débitmètre massique, et la source d'air «propre»	97
3.1.2	Les méthodes	98
3.1.2.1	Méthodes de choix du type de polissage et de l'abrasif.....	98
3.1.2.2	Méthodes de choix de la plage de la charge manuelle normale.	98
3.1.2.3	Méthodes des plans d'expériences.....	99
3.1.2.4	Méthodes d'estimation et de modélisation du taux d'émission.	99
3.1.2.5	Méthode de Simpson d'estimation des poussières totales	100
3.1.2.6	Méthode d'estimation du taux d'émission au polissage linéaire.....	101
3.2	Présentation des principaux résultats obtenus.....	101
3.2.1	Comportement des concentrations temporelles au cours du polissage ...	103
3.2.1.1	Comportement temporel des concentrations de poussières au polissage linéaire des granites «noir» et «blanc» avant la dilution.....	103
3.2.1.2	Comportement des concentrations temporelles calculées à partir du facteur de dilution moyen au polissage linéaire des granites «noir» et «blanc».....	105
3.2.2	Analyse du processus d'émission de poussières de granites	106
3.2.2.1	L'influence de la microstructure des granites et des forces de coupe sur l'émission des poussières.....	118
3.2.2.2	L'influence de la géométrie de l'abrasif sur l'émission des poussières	121
3.2.3	Taux d'émission des poussières au cours du polissage des granites	121
3.2.3.1	Étude comparative du taux d'émission des nuances de granites.....	122

3.2.3.2	Les modèles de taux d'émission des poussières de granite sous des charges manuelles.....	122
3.2.3.3	Les modèles d'enlèvement de la matière convertis en taux d'émission et comparaison avec le modèle proposé	123
3.2.3.4	L'estimation du coefficient d'émissivité spécifique des granites	123
3.3	Conclusion partielle	124
CONCLUSION.....		127
RECOMMANDATIONS		129
ANNEXE I	INVENTAIRE DES DILUTEURS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES ..	131
ANNEXE II	DILUTEUR À INJECTION, SIMULATION ET COURBE DE DILUTION	133
ANNEXE III	BANC D'ESSAI ET POLISSEUSE MAKITA	135
ANNEXE IV	MODÈLES D'ÉMISSION DE POUSSIÈRES D'USINAGE	137
ANNEXE V	MODÈLES DE TAUX D'ENLÈVEMENT DE LA MATIÈRE	139
BIBLIOGRAPHIE		141

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Taille des grains dans la microstructure des granites..... 7
Tableau 1.2	Propriétés du granites noir «Cambrien» et du Granit blanc «Astra» 8
Tableau 1.3	Plages de rugosité moyenne arithmétique selon le procédé..... 10
Tableau 1.4	Comparaison des polisseuses..... 15
Tableau 1.5	Désignation et taille des grains abrasifs..... 16
Tableau 1.6	Niveau d'efficacité de réduction de pertes d'aérosols par les charges électriques 23
Tableau 1.7	Comparaison des systèmes de dilution des aérosols..... 39
Tableau 2.1	Caractéristiques des rotamètres..... 47
Tableau 2.2	Caractéristiques de l'analyseur LFG 20..... 51
Tableau 2.3	Diamètres de mobilité mesurés au cours de l'échantillonnage par dilution 70
Tableau 2.4	Caractéristiques de la distribution des concentrations numériques à l'état initial..... 70
Tableau 3.1	Conditions de polissage 95

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Coupe transversale du granite : (a) Croquis; (b) photo granite «noir»; (c) photo granite «blanc» 7
Figure 1.2	Opérations de polissage 9
Figure 1.3	Modélisation du polissage..... 10
Figure 1.4	Modes de génération des poussières pour un outil de coupe..... 13
Figure 1.5	Formation de copeau et émission pour un outil à angle de coupe positif.... 13
Figure 1.6	Formation de copeau et émission des poussières pour un outil à angle de coupe négatif..... 14
Figure 1.7	Opération de polissage : (a) linéaire rectiligne; (b) pendulaire..... 14
Figure 1.8	Échantillonnage de poussières: (a) directe; (b) indirecte 18
Figure 1.9	Échantillonnage mixte 18
Figure 1.10	Dispositif d'échantillonnage des poussières d'usinage 19
Figure 1.11	Croquis d'un diluteur à injection 21
Figure 1.12	Graphique des facteurs de dilution et de la pénétration en fonction du diamètre de la particule..... 26
Figure 1.13	Croquis du diluteur à résidence..... 30
Figure 1.14	Croquis du diluteur à résidence DRI..... 30
Figure 1.15	Croquis du diluteur à résidence avec conditionnement 31
Figure 1.16	Croquis d'un diluteur à injection avec une section de mélange 31
Figure 1.17	Croquis d'un diluteur à injection multi-sections 32
Figure 1.18	Croquis d'un diluteur à injection PALAS..... 32

XVIII

Figure 1.19	Croquis d'un diluteur à filtre de Collins	33
Figure 1.20	Croquis d'un diluteur à filtre TSI et TOPAS	33
Figure 1.21	Diluteur à rotor de TSI modèle #379020A	34
Figure 1.22	Diluteur à rotor de Giechaskiel	34
Figure 1.23	Diluteur à rotor CAMBUSION-DMS 500.....	35
Figure 1.24	Graphique du facteur de dilution du diluteur à rotor	35
Figure 1.25	Croquis du diluteur à volume constant : (a) injection parallèle; (b) injection orthogonale.....	37
Figure 1.26	Croquis du diluteur à volume constant : (a) injection complète; (b) injection partielle.....	38
Figure 2.1	Dispositif expérimental des essais de dilution de NaCl.....	43
Figure 2.2	Croquis du tube à gel de silice	43
Figure 2.3	Diluteur à volume constant : (a) modèle CATIA, (b) coupe transversale	45
Figure 2.4	Débitmètres TSI4100S.....	45
Figure 2.5	Rotamètres: (a) Photo modèle Gillian, Duter, et Gallian; (b) Coupe longitudinale	46
Figure 2.6	Graphiques d'étalonnage du rotamètre à bille	46
Figure 2.7	Croquis du SMPS.....	50
Figure 2.8	Croquis du compteur de particules	50
Figure 2.9	Photo du banc d'essai de dilution du CO ₂	51
Figure 2.10	Schéma de principe de l'absorptiométrie IR.....	51
Figure 2.11	Organigramme du processus dilution	54
Figure 2.12	Graphiques de la concentration expérimentale et du modèle de régression homographique.....	63
Figure 2.13	Graphiques de la concentration expérimentale et du modèle de régression exponentiel.....	63

Figure 2.14	Graphique expérimental et modèle de régression linéaire du facteur de dilution à la pression d'émulsion respective : (a) 30 PSI, (b) 40 PSI.....	64
Figure 2.15	Graphiques du facteur de dilution et des modèles de dilution à une pression d'émulsion constante.	65
Figure 2.16	Graphiques à 30 et 40 PSI : (a) concentration des aérosols NaCl, (b) facteur de dilution des aérosols NaCl.....	67
Figure 2.17	Graphiques à différentes concentrations de solutions aqueuses de NaCl : (a) concentration des aérosols NaCl, (b) facteur de dilution.....	68
Figure 2.18	Spectre des concentrations d'aérosols NaCl en fonction du diamètre de mobilité compris entre 10 et 225 nm.....	69
Figure 2.19	Distribution des concentrations d'aérosols NaCl avant dilution et après dilution pour un débit d'«air propre» respectif de 0.2 ; 0.3 ; et 0.4 LPM....	72
Figure 2.20	Distribution des concentrations d'aérosols NaCl avant dilution et après dilution pour un débit d'«air propre» respectif de 0.5 ; 0.6 ; et 1 LPM.....	73
Figure 2.21	Graphique expérimental et droite moyenne du facteur de dilution en fonction du diamètre de mobilité (10-225 nm) pour un débit d'«air propre» constant de 0,2 LPM.....	74
Figure 2.22	Graphique des spectres de concentrations sans dilution, avec dilution et reconstitués à partir du facteur de dilution à 0,2 LPM.....	74
Figure 2.23	Graphique du modèle homographique des concentrations de CO ₂ (à 100%) pour des débits variables de CO ₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM)	77
Figure 2.24	Graphique du modèle exponentiel des concentrations de CO ₂ (à 100%) pour des débits variables de CO ₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM).....	77
Figure 2.25	Graphiques du facteur de dilution «concentration» pour une injection à 100% de CO ₂ et pour de débits variables de CO ₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM)	78

Figure 2.26	Graphiques du facteur de dilution «débit» pour une injection à 100% de CO ₂ et pour de débits variables de CO ₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM).....	78
Figure 2.27	Graphiques des facteurs de dilution «concentration», «débit» et «théorique» pour 100% de CO ₂ à débit d'injection de 0.6 LPM	79
Figure 2.28	Graphiques des facteurs de dilution «concentration», «débit» et «théorique» pour 100% de CO ₂ avec le débit d'injection de CO ₂ à 0.8 LPM.....	79
Figure 2.29	Graphiques du facteur de dilution «concentration» pour des débits d'air «propre» inférieur à 2.5 LPM, à 100% de CO ₂ et avec des débits d'injection de CO ₂ variables	80
Figure 2.30	Graphiques du facteur de dilution «concentration» pour des débits d'air «propre» supérieur à 1LPM, à 100% de CO ₂ et à de débits variables : 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, et 1 LPM	80
Figure 2.31	Graphiques des concentrations diluées à différents pourcentages de CO ₂ avec des débits variables	83
Figure 2.32	Graphiques des concentrations diluées à différents pourcentages de CO ₂ à un débit constant.....	83
Figure 2.33	Graphiques d'évolution des facteurs de dilution à des concentrations différentes de CO ₂ , à des débits d'injection de CO ₂ très faibles.....	84
Figure 2.34	Graphiques d'évolution des facteurs de dilution à des concentrations différentes de CO ₂ et à un débit d'injection du CO ₂ constant	84
Figure 2.35	Graphiques du facteur de dilution des aérosols NaCl à la pression de 30 PSI comparé à celui du gaz traceur CO ₂ avec un débit d'injection de 0.8 LPM.....	91
Figure 2.36	Graphiques du taux de dilution des aérosols NaCl à la pression de 30 PSI comparé à celui du gaz traceur CO ₂ avec un débit d'injection de 0.8 LPM.....	91
Figure 3.1	Photo du dispositif expérimental d'essai de polissage et de dilution.....	93

Figure 3.2	Échantillon de granites : (a) Croquis et (b) photo	95
Figure 3.3	Photo du profilomètre Mitutoyo® SJ-400	95
Figure 3.4	DUSTTRAK #8530 : (a) Photo; (b) Dispositif de mesure, (c) Circuit de l'aérosol	97
Figure 3.5	Processus des plans d'expériences pour les essais de polissage	102
Figure 3.6	Processus d'estimation du taux d'émission de PM _{2.5} au polissage linéaire	102
Figure 3.7	Méthodologie de modélisation du taux d'émission de PM _{2.5} au polissage linéaire	103
Figure 3.8	Concentrations temporelles à 46 N: (a) granite «noir», (b) granite «blanc»	107
Figure 3.9	Concentrations temporelles à 51 N: (a) granite «noir», (b) granite «blanc»	108
Figure 3.10	Concentrations temporelles à 56 N: (a) granite «noir», (b) granite «blanc»	109
Figure 3.11	Concentrations temporelles à 61 N: (a) granite «noir», (b) granite «blanc»	110
Figure 3.12	Concentrations temporelles avec dilution pour le granite «noir» sous les charges normales : (a) 51N; (b) 56N.....	111
Figure 3.13	Concentrations temporelles avec dilution pour le granite «blanc» sous les charges normales : (a) 46N; (b) 51N.....	112
Figure 3.14	Concentrations temporelles avec dilution pour le granite «blanc» sous les charges normales : (a) 56N; (b) 61N.....	113
Figure 3.15	Graphiques du facteur de dilution au cours des essais sur : (a) Granite «noir», (b) Granite «blanc»	114
Figure 3.16	Concentrations temporelles brutes et celles calculées à partir du facteur de dilution de 5 pour le granite «noir» : (a) Charge de 51 N, (b) Charge de 56 N	115

Figure 3.17	Concentrations temporelles brutes et celles calculées à partir du facteur de dilution de 5 pour le granite «blanc» : (a) Charge de 46 N, (b) Charge de 51 N	116
Figure 3.18	Concentrations temporelles brutes et celles calculées à partir du facteur de dilution de 5 pour le granite «blanc» : (a) Charge de 56 N, (b) Charge de 61 N	117
Figure 3.19	Graphiques de poussières totales en fonction de la charge au polissage linéaire du granite : (a) brutes, (b) calculées à partir du DF	119
Figure 3.20	Graphiques des forces de polissage et des concentrations de poussières :(a) granite «noir»; (b) granite «blanc»;	120
Figure 3.21	Modèle d'émission des poussières de granite pour les abrasifs à angle de coupe positif.....	125
Figure 3.22	Modèle d'émission des poussières de granite pour les abrasifs à angle de coupe négatifs	125
Figure 3.23	Modèles de régression de type exponentiel pour le taux d'émission des granites entre 46 et 61 N	126
Figure 3.24	Comparaison des modèles d'estimation du taux d'émission de PM2.5 pour le granite «blanc» et le granite «noir».....	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CERP	Programme de réduction des émissions de fonderie / <i>Casting emission reduction program</i>
Coag.	Coagulation de l'aérosol
CSST	Comité de santé et sécurité au travail
DF	Facteur de dilution / <i>Dilution factor</i>
DMA	Analyseur différentielle de mobilité / <i>Differential mobility analyser</i>
DR	taux de dilution / <i>Dilution ratio</i>
DRI	Institut de recherche sur le désert / <i>Desert research institute</i>
D _u	Unité de poussières / <i>Dust unit</i>
DUSTTRAK	Suivi et comptage de la poussière / <i>Dust tracking</i>
EPA	Agence de protection de l'environnement / <i>Environmental protection agency</i>
Evap.	Évaporation de l'aérosol
GPL	Gramme par litres / <i>Gramm per liter</i>
LPM	Litre par minute / <i>Liter per minute</i>
mLPM	Millilitre par minutes / <i>Milliliter per minute</i>
Perd.	Aérosols perdus
PSI	Livre par pouce carré / <i>Pound per square inch</i>
RPM	Tours par minutes / <i>Revolution per minute</i>
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité au travail
SMPS	Compteur de particules par de taille de mobilité / <i>Scanning mobility particle sizer</i>
WHO	Organisation mondiale de la santé / <i>World health organization</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

e	Amplitude de l'unité élémentaire de la charge (C)
R^2	Coefficient de corrélation de régression
$C(d_{ae})$	Coefficient de correction de Rader
k	Coefficient de coagulation des aérosols (cm^3/s)
K, K	Coefficient d'émissivité spécifique (N. $\mu\text{g/s}$), constante expérimentale
c	Constante dépendant de la longueur de la chambre et de la longueur d'onde
$C_{p,di}$	Concentration numérique de l'air «pollué» pour les aérosols de taille d_i ($\#/\text{cm}^3$)
$C_{pr,di}$	Concentration numérique de l'air «propre» pour les aérosols de taille d_i ($\#/\text{cm}^3$)
$C_{S,di}$	Concentration numérique du mélange air «propre» et air «pollué» pour les aérosols de taille d_i à la sortie du diluteur ($\#/\text{cm}^3$)
$C_{perd,di}$	Concentration numérique perdu au cours de la dilution pour les aérosols de taille d_i ($\#/\text{cm}^3$)
C_{i_SD}	Concentration numérique ou massique «sans dilution» ($\#/\text{cm}^3$ ou mg/m^3)
C_{i_D}	Concentration numérique ou massique «avec dilution» ($\#/\text{cm}^3$ ou mg/m^3)
C_p	Concentration de l'«air pollué» ($\#/\text{cm}^3$, mg/m^3 ou %)
C_S	Concentration du mélange air «propre» et air «pollué» ou concentration diluée ($\#/\text{cm}^3$, mg/m^3 ou %)
C_L	Concentration limite de dilution ($\#/\text{cm}^3$, mg/m^3 ou %)
C_T	Poussière totale (mg/m^3)
C_i	Concentration massique des poussières PM2.5 à la date t_i (mg/m^3)
C_{i-1}	Concentration massique des poussières PM2.5 à la date t_{i-1} (mg/m^3)
$K_{pr}; K_p$	Constantes expérimentales respectivement 0.77 et 0.86
$\gamma_{pr}; \gamma_p$	Constantes adiabatiques respectives de l'air «propre» et l'air «pollué».
t_i	Date de polissage
n_{pr}	Débit molaire de l'air «propre» à l'entrée du diluteur (mol/s)
n_p	Débit molaire de l'air «pollué» à l'entrée du diluteur (mol/s)
n_S	Débit molaire du mélange air «propre» et air «pollué» à la sortie du diluteur (mol/s)

M_i	Débit massique de l'air «propre» ou l'air «pollué» (mol/s)
M_{pr}	Débit massique de l'air «propre» à l'entrée du diluteur (mg/s)
M_p	Débit massique de l'air «pollué» à l'entrée du diluteur (mg/s)
M_S	Débit massique du mélange air «propre» et air «pollué» à la sortie du diluteur (mg/s)
Q	Débit d'échantillonnage du photomètre DUSTTRAK (LPM)
Q_i	Débit volumique de l'air «propre» ou l'air «pollué» (LPM)
Q_{pr}	Débit volumique de l'air «propre» à l'entrée du diluteur (LPM)
Q_p	Débit volumique de l'air «pollué» à l'entrée du diluteur (LPM)
Q_S	Débit volumique du mélange air «propre» et air «pollué» à la sortie du diluteur (LPM)
Q_t	Débit d'écoulement total de l'air venant de la gaine et de l'aérosol polydispersé
Q_t	Débit d'écoulement de l'aérosol monodispersé (LPM)
d_{me}	Diamètre de mobilité électrique de l'aérosol (en μm ou nm)
d_{ae}	Diamètre aérodynamique de l'aérosol (en μm ou nm)
d_p	Diamètre de la particule (en μm ou nm)
t_p	Durée de polissage (s)
DF	Facteur de dilution moyen calculé à partir des concentrations ou à partir du débit
DF_T	Facteur de dilution théorique
DF_D	Facteur de dilution calculé à partir du débit
DF_V	Facteur de dilution calculé à partir du débit volumique
$DF_{p,di}$	Facteur de dilution numérique pour les aérosols de taille d_i
DF_{TD}	Facteur de dilution théorique calculé à partir du débit
DF_{TC}	Facteur de dilution théorique calculé à partir de la concentration numérique
DF_{CN}	Facteur de dilution calculé à partir de la concentration numérique
DF_{CM}	Facteur de dilution calculé à partir de la concentration massique
DF_M	Facteur de dilution calculé à partir de la concentration massique
DF_C	Facteur de dilution calculé à partir de la concentration

F_z	Force normale appliquée au cours du polissage (N)
f	Fréquence de rotation du rotor (Hz)
I	Intensité lumineuse infrarouge du détecteur de présence du CO_2
I_0	Intensité lumineuse IR du détecteur de présence du gaz zéro
L	Longueur entre l'entrée et la sortie de l'aérosol (m)
L_s	Longueur totale de polissage au cours de la durée de polissage (m)
$M_{\text{Mol, pr}}$	Masse molaire de l'air «propre» (g/mol)
$M_{\text{Mol, p}}$	Masse molaire de l'air «pollué» (g/mol)
$M_{2.5}$	Masse de poussières PM2.5 (en kg)
m_p	Masse de matière enlevée par unité de temps de polissage (en kg/s)
m_s	Masse de micro-copeaux sédimentés (en kg)
$m_{\text{non}2.5}$	Masse de poussières dont le diamètre aérodynamique est supérieur à 2,5 μm et qui n'ont pas été échantillonnés par l'impacteur 2.5 (en kg)
ρ_i	Masse volumique de l'air «propre» ou l'air «pollué» (kg/m^3)
ρ_{pr}	Masse volumique de l'air «propre» (kg/m^3)
ρ_p	Masse volumique de l'air «pollué» (kg/m^3)
ρ_s	Masse volumique du mélange air «propre» et air «pollué» à la sortie du diluteur (kg/m^3)
ρ_{eff}	Masse volumique effective de la particule (kg/m^3)
ρ_0	Masse volumique de l'eau (kg/m^3)
Z	Mobilité électrique
n_C	Nombre de cavités du diluteur à rotor
n	Nombre de charges élémentaires portées par la particule
N_p	Nombre des particules contenu dans l'air «pollué»
N_s	Nombre des particules contenu dans le mélange air «propre» et air «pollué»
$P_{p, di}$	Pénétration de l'aérosol de taille d_i pendant la dilution
$L_{p, di}$	Perte numérique de l'aérosol de taille d_i pendant la dilution
P_{pr}, P_p	Pressions d'injection respectives de l'air «propre» et l'air «pollué» (kPa)
$P_{\text{pr},1}$	Pressions d'injection de l'air «propre» dans la position 1 (kPa)

XXVIII

$P_{pr,2}$	Pressions d'injection de l'air «propre» dans la position 2 (kPa)
P_S	Pressions du mélange à la sortie du diluteur (kPa)
P_{atm}	Pression atmosphérique (kPa)
P_0	Pression dans les conditions normales (kPa)
P	Pression dans les conditions d'écoulement dans le DMA (kPa)
ζ_V	Taux d'émission ($\mu\text{g/s}$)
DR_V	Taux de dilution volumique
d_i	Taille de l'aérosol (diamètre de mobilité ou diamètre aérodynamique) (en μm ou nm)
Δt ou t_p	Temps de polissage (s)
t_r	Temps de résidence dans la chambre de mélange (s)
T_0	Température dans les conditions normales (K)
T	Température dans les conditions d'écoulement dans le DMA (K)
T_{VD}	Taux de variation de la concentration des aérosols NaCl ou du gaz traceur (mg.s/ cm^6 , $\text{\#.s/cm}^6$, $\text{\% .s / cm}^3$)
V	Tension au centre de l'électrode (kV)
r_1 ; r_2	Rayons intérieur et extérieur de l'électrode du DMA (m)
A_{pr} , A_p	Sections d'injection respectives de l'air «propre» et l'air «pollué» (m^2)
Δm	Variation de masse avant et après polissage (en kg)
ΔC_{NT}	Variation de la concentration massique, numérique ou volumique (mg/cm^3 , $\text{\#/cm}^3$ ou en $\text{\%vol.}$)
ΔQ_{pr}	Variation de débit d'«air propre» (LPM)
η	Viscosité dynamique du gaz absolu (Pa.s)
V_{pr}	Volume de l'air «propre» à l'entrée du diluteur (cm^3)
V_p	Volume de l'air «pollué» à l'entrée du diluteur (cm^3)
V_S	Volume du mélange air «propre» et air «pollué» à la sortie du diluteur (cm^3)
Q_g	Volume d'«air pollué» prélevé par seconde dans le diluteur à rotor (cm^3)
V_C	Volume de la cavité du diluteur à rotor (cm^3)

INTRODUCTION

La qualité du fini de surface est un enjeu majeur dans le processus de polissage des roches telles que le granite, le grès, le quartz, l'ardoise, la diorite, et le marbre. Il est pertinent de noter que les imperfections de surface doivent être limitées au cours de ce processus afin que le produit final conserve sa brillance qui est un atout majeur de sa commercialisation. Dans ce cadre le nombre et l'étendue des défauts dépend de l'enlèvement de la matière, de la pression de polissage, du nombre de passes de l'outil abrasif et du temps de polissage. Ces opérations de polissage qui recommandent beaucoup de précision sont l'objet d'émissions de poussières nocives pour l'ouvrier. Dans ce cadre, Forest et al (2007) ont mené une étude sur l'exposition aux poussières de matériaux contenant de la silice sous forme de quartz comme le granite pour le secteur de la construction du Québec. L'échantillonnage et l'analyse des prélèvements ont été réalisés selon la méthode 206-2 de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Leurs résultats montrent que : 44,2 % de l'ensemble des ouvriers évalués ont eu une exposition moyenne journalière estimée supérieure à la VEMP de la norme québécoise d'exposition au quartz (silice cristalline) de $0,1 \text{ mg/m}^3$ du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST); 9,2 % des ouvriers évalués ont eu une exposition moyenne journalière estimée supérieure à la limite d'excursion à ne pas dépasser pour quelque durée que ce soit de $0,5 \text{ mg/m}^3$; la tendance est à des expositions moins élevées lorsque des mesures de réduction à la source (arrosage, aspiration) sont systématiquement appliquées. De manière générale, les facteurs contribuant à l'exposition des travailleurs sont multiples et réfèrent à la teneur en quartz des matériaux, aux méthodes utilisés dans certains procédés, à la cadence de production, à l'environnement, à la localisation des travaux, et aux conditions météorologiques. La CSST considère à partir des 133 cas de silicose pris en charge que le polissage des matériaux rocheux contribue à détériorer sévèrement la santé des ouvriers de ce secteur d'activités.

Par ailleurs, ces opérations de polissage, lorsqu'elles émettent des fortes concentrations de poussières sont également susceptibles de rendre les appareils de mesure de la qualité de l'air inopérants. Dans cette situation, l'échantillonnage des poussières devient complexe surtout avec les multiples trajectoires multiples prises par les particules au moment de leur émission. C'est ainsi que les débordements de limite supérieure de lecture sont observés au cours de l'échantillonnage des poussières.

La recherche actuelle s'investit sur les moyens technologiques en vue de faciliter le processus de mesurage des fortes concentrations de poussières avec des conditions d'émission variées. L'objectif des chercheurs est d'une part, d'effectuer à moindres coûts une bonne évaluation de la qualité de l'air en atelier de polissage et ensuite d'utiliser la chaîne de mesurage pour développer des modèles de prédiction des émissions, d'autre part. Cette problématique encourage l'étude du comportement des aérosols au moment de leur génération, de leur transport et de leur échantillonnage.

Dans la plupart des travaux consultés dans la littérature, les aérosols présentent une complexité avérée lorsqu'ils sont échantillonnés très proches leur source d'émission. Ainsi, il est difficile, voire onéreux et non sécuritaire de procéder à des essais de polissage de matériaux où le but visé est de mesurer la poussière émise dans l'air ambiant, car ces particules peuvent contaminer l'environnement.

Pour cette raison sécuritaire, le RSST encadre toute activité susceptible d'enfreindre aux normes d'hygiène, de santé et de sécurité au travail. Cette alternative sécuritaire justifie à plus d'un titre le choix porté sur les aérosols de Chlorure de sodium (NaCl) pour étudier le comportement de la poussière. Plusieurs études ont montré l'efficacité des aérosols de Chlorure de sodium pour substituer certains aérosols dits «dangereux» notamment les nanoparticules manufacturées. C'est pourquoi, leur utilisation pour l'étude de la dilution s'avère adéquat. En outre, le remplacement des aérosols de «procédés» par les aérosols de NaCl se justifie également par la réalité industrielle où les sources d'émission de polluants sont difficilement isolables pour une étude phénoménologique. Dans ces conditions, les aérosols «secs» de NaCl pourraient valablement substituer les poussières de granite émises au cours du polissage. Le présent travail de recherche utilise les aérosols «secs» de NaCl générés artificiellement à partir d'un émulseur pour étudier la dilution de ceux-ci lorsqu'on y ajoute de l'air «propre» dans un volume constant. Les conditions de fortes concentrations d'aérosols sont mis en œuvre pour d'une part observer le comportement des aérosols et d'estimer les facteurs de dilution exploitables dans un échantillonnage ultérieur, d'autre part.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier le comportement des aérosols de NaCl au cours de leur dilution dans un volume constant appelé diluteur. Les objectifs secondaires consistent à étudier l'influence de la concentration (de NaCl en solution aqueuse ou du gaz traceur CO₂), de la pression d'émulsion, du débit d'injection de l'air «pollué» (des aérosols NaCl ou du gaz traceur CO₂), du débit d'injection de l'air «propre» sur la concentration du mélange à la sortie du diluteur et le facteur de dilution ; à déterminer le maximum du facteur de dilution fourni par le diluteur à volume constant utilisé pour les débits d'air «pollué» de l'ordre du dixième, du centième et du millième de LPM ; à développer les modèles régression permettant de prédire le facteur de dilution ; à comparer les modèles développés à partir de leur coefficient de corrélation en vue d'un choix ; à comparer le facteur de dilution et le taux de dilution des aérosols NaCl à ceux du gaz traceur CO₂ afin d'interpréter l'usage courant d'un gaz traceur pour l'étude des poussières ou des aérosols ; à appliquer le facteur de dilution maximal obtenu au cours de l'étude de la dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO₂ à l'échantillonnage des poussières PM2.5 de silice pour un cas de polissage réel des granites notamment le polissage linéaire rectiligne ; à comparer les concentrations temporelles des émissions de poussières PM2.5 de silice et à estimer les poussières totales dans deux cas : la situation d'avant dilution avec les pertes du spectre des concentrations massiques et la situation d'après dilution où le spectre est reconstitué à partir du facteur de dilution utilisé ; à choisir du facteur de dilution moyen pour reconstituer le spectre des concentrations d'avant dilution ; à étudier l'influence de la charge normale (pour les travaux de polissage manuel), de la nuance de granite (granite «noir» à 10% de Si et granite «blanc» à 50% de Si), du mode d'échantillonnage (avec dilution et sans dilution) sur les concentrations massiques d'émission de PM2.5, sur les poussières totales et sur le taux d'émission ; à développer un modèle de prédiction du taux d'émission selon la nuance de granite pour le polissage linéaire et manuel dans les conditions expérimentales proches du milieu industriel ; à comparer le modèle de prédiction du taux d'émission développé avec les modèles de taux d'émission déduits des modèles de taux d'enlèvement de la matière ; et à estimer le coefficient d'émissivité spécifique selon la nuance de granite.

Ce travail de recherche est structuré en trois chapitres : Le premier se consacre à la revue de la littérature ; le deuxième étudie la dilution des aérosols de Chlorure de sodium (NaCl) et du gaz traceur CO₂. Puis, il compare les deux dilutions pour conclure sur les possibilités de substitution généralement effectuées pendant les travaux portant sur la dispersion, le transport et la dilution; le troisième applique le facteur de dilution maximal à l'échantillonnage des aérosols PM_{2.5} durant le polissage des granites. Il retrouve les spectres d'émission d'avant dilution en appliquant le facteur de dilution utilisé au spectre des concentrations diluées. Il compare les taux d'émission selon la nuance de granite. Il propose un modèle empirique du taux d'émission pour chaque nuance de granite. Il définit et estime le coefficient d'émissivité spécifique de chaque nuance de granite dans les conditions de polissage utilisées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La compréhension de la phénoménologie des émissions de polissage du granite est récente dans la littérature. Pourtant, le polissage est un procédé d'usinage par abrasion dont l'utilisation par l'homme se fait depuis la préhistoire. Dans ce chapitre, les principaux concepts sur les granites sont présentés. Un inventaire des méthodes de polissage permet de le distinguer des autres procédés de fabrication. L'état de l'art sur l'échantillonnage des poussières et les systèmes de dilution est développé pour ressortir la pertinence de l'étude.

1.1 Matériau de granite et le procédé de polissage

La connaissance du matériau abrasif ou du granite est essentielle pour toute étude portant sur le polissage et ses émissions. C'est pourquoi cette section est consacrée à la description physique du granite, aux méthodes de polissage, aux outils utilisés dans le cadre expérimental, à la compréhension des processus liés à l'émission et à l'échantillonnage des poussières.

1.1.1 Matériau «granite»

C'est une roche volcanique dont le nom vient du latin «*granum*» qui signifie «grain». Sur le plan de l'observation microscopique, le grain représente la grandeur moyenne des zones constituées par une association de minéraux de même nature. En général, le grain est visible à l'observation oculaire pour les granites comportant des tailles variant entre 2 à 5 millimètres. Siegesmund et Dürrast (2011) décrivent le grain par des cristaux imbriqués comportant trois minéraux notamment le feldspath, le quartz et le mica (Figure 1.1). Le feldspath est de couleur blanche (opaque). Il se présente sous la forme de Silico-aluminate de Potassium ($\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{K}$), Silico-aluminate de Sodium ($\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$) ou de Silico-aluminate de Calcium ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8\text{Ca}$). Le quartz est de couleur grise (transparente et translucide). Il contient une forte proportion de silice cristalline (SiO_2). Le mica est couleur noire ou blanche (opaque ou transparent ou translucide) et il forme de minuscules paillettes à reflets mordorés.

Ces paillettes de mica peuvent être de la biotite $\{K(MgF)_3, Si_3AlO_{10}(OH,F)_2\}$ ou de la muscovite $\{KAl_2, (Si_3AlO_{10}(OH,F)_2)\}$. À ces trois éléments principaux va s'ajouter quelquefois du pyroxène $\{(Mg, Fe)_7(SiO_3)_2\}$ caractérisé par sa couleur noire foncée à l'éclat brillant.

1.1.1.1 Les variétés de granites et la composition minéralogique

Les granites se différencient globalement par leur couleur (paramètre important lors de la commercialisation) et leur microstructure (taille du grain et sa structure cristallographique). Les couleurs du granite peuvent être blanche, grise, jaune, bleutée, rose, ou rouge selon leur histoire géologique. Ainsi, on distingue les granitoïdes, les granodiorites, les gneiss et les migmatites. Leur classement dépend de la taille des grains (Tableau 1.1).

Globalement les granites se subdivisent en deux groupes selon leur composition chimique : le granite alcalin sodique (ou sodi-potassiques) et le granite calco-alcalin. Le granite alcalin sodique est constitué de peu de feldspaths plagioclases, du quartz en abondance, du feldspath orthose, de l'amphibole sodique, du pyroxène sodique, de l'apatite, du zircon et de la tourmaline. Il est pauvre en calcium, en aluminium, ou en magnésium et riche en minéraux rares notamment la fluorite, la monazite, le pyrochlore et la cryolithe. Par contre, les granites calco-alcalins comporte un pourcentage élevé de plagioclases, de feldspaths alcalins, de feldspaths microclines, de quartz, de biotite, de sphène, de zircon magnétite, et de magnétite.

Les granites se classent aussi selon leur richesse en minéraux alumineux et ferro-magnésiens. Les géologues les divisent en trois familles comprenant les granites hololeucocrates (forte proportion en quartz feldspathique), les granites mésocrates (biotite et muscovite) et les granites à amphibole (ou à pyroxène). Toutefois, la composition moyenne d'un granite ordinaire est de 70 à 77% de SiO_2 , 11 à 15% de Al_2O_3 , 3 à 5% de K_2O , 3 à 5% de Na_2O , 2 à 3% de Fe, 1% de CaO, moins de 1% de MgO et TiO_2 .

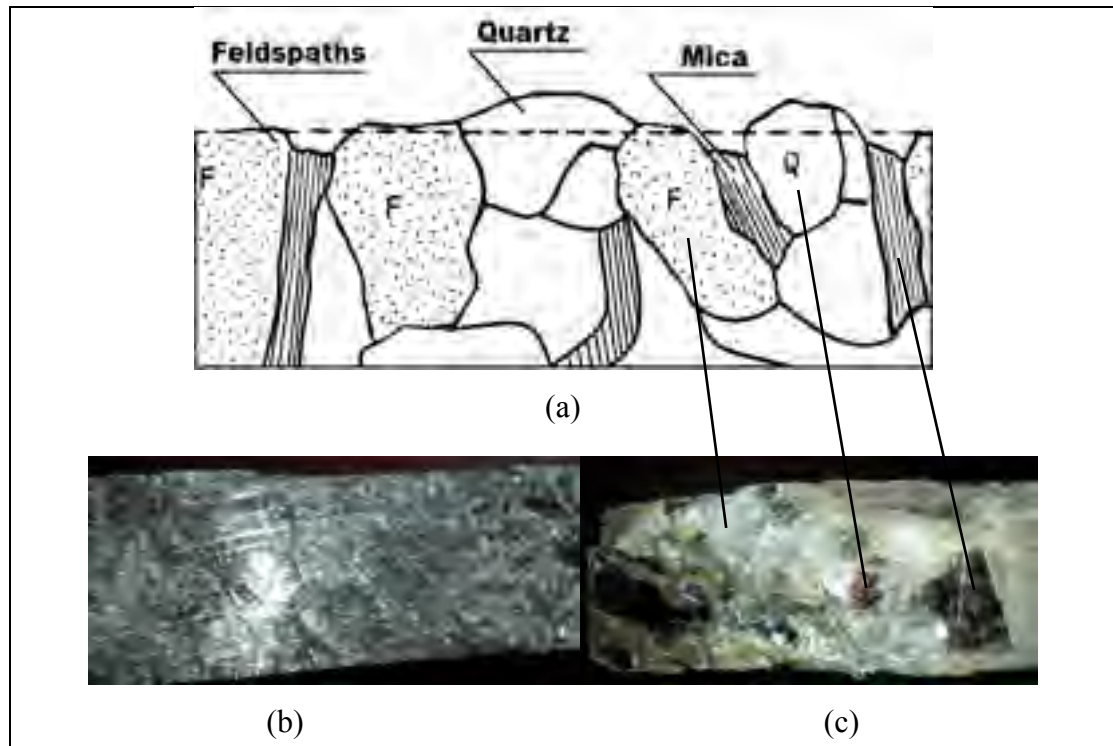


Figure 1.1 Coupe transversale du granite : (a) Croquis; (b) photo granite «noir»; (c) photo granite «blanc»

Tableau 1.1 Taille des grains dans la microstructure des granites
Adapté de [http://www.ctmnc.fr/images/galerie/ Quelques_notions_de_geologie.pdf](http://www.ctmnc.fr/images/galerie/Quelques_notions_de_geologie.pdf). consulté le 28/02/2014

Désignation du granite	Nom générique	Plage de la taille du grain (mm)
Microgranite		< 0.001
Grain très fin	Aplites	0.001 à 0.5
Grain fin		0.5 à 2
Grain moyen		2 à 3
Gros grain		3 à 10
Très gros grain	Pegmatites	>10

1.1.1.2 Les propriétés et la microstructure des granites

Les propriétés physiques et mécaniques des granites sont résumées au Tableau 1.2. Ils se distinguent des autres roches par leur masse volumique (entre 2550 et 2740 kg/m³) proche de celle de l'aluminium (2700 kg/m³). Dans ce cas ils sont légers par rapport à l'acier et peuvent également être utilisés lors des fortes vibrations mécaniques. La microstructure du granite montre que les grains n'ont pas une forme géométrique précise. Le mica et le feldspath présentent une forme cristalline solidement emboîtés les uns dans les autres. Le quartz occupe les interstices se trouvant entre le mica et le feldspath.

Weiss (1992) a montré que la surface des granites présentait des microporosités dont les dimensions varient selon la nuance. Ces porosités, bien que peu nombreuses sont des voies pouvant permettre l'absorption des fluides de coupe au cours du polissage. Le taux d'absorption des liquides ou des gaz détermine le type de polissage à réaliser (avec ou sans lubrification), car ils peuvent compromettre certaines propriétés mécaniques et optiques (Xie et Tamaki, 2007). En général, le granite est léger, résistant aux chocs et à la compression, réfractaire, non conducteur d'électricité, non magnétique, incombustible, inaltérable, inusable, et très dur.

Tableau 1.2 Propriétés du granites noir «Cambrien» et du Granit blanc «Astra»
Adapté de www.policor.com consulté le 28/02/2014

Caractéristiques	Granit noir «Cambrien»	Granit blanc «Astra»	Références-Normes
Pourcentage en silice (%)	Bas (10%)	Élevé (50%)	POLYCOR
Masse volumique (kg/m ³)	2870	2788	ASTMC97
Porosité (%)	0.11	0.14	ASTMC97
Résistance compression (MPa)	211	173	ASTMC170
Module de rupture (MPa)	18.1	12.6	ASTMC99
Dilatation thermique (W/m °K)	faible	faible	POLYCOR

1.1.2 Le polissage et les émissions de poussières

Le polissage est un procédé consistant à frotter une pièce antagoniste en y exerçant un effort normal constant et contrôlé, jusqu'à obtenir une surface d'excellentes propriétés optiques (Figure 1.2) et une rugosité inférieure à $0.4 \mu\text{m}$ (Tableau 1.3).

1.1.2.1 Description physique du processus de polissage

La physique du polissage est décrite par El Hofy (2007) comme l'action combinée de la meule, du grain abrasif contenu dans la meule, de la microstructure du matériau, de l'état de surface initial et des paramètres de polissage (Figure 1.3). Au cours de ce processus, l'expérimentateur peut étudier une ou plusieurs réponses notamment les forces, la température, la concentration en poussières émises, les vibrations de polissage, l'usure de la meule, la masse de matière enlevée et l'état de surface final. Les facteurs pris en compte sont principalement la force normale de pression, la nuance de matériau, le grade de l'abrasif, les conditions d'échantillonnage des poussières, et le type de mouvement.



Figure 1.2 Opérations de polissage

Tableau 1.3 Plages de rugosité moyenne arithmétique selon le procédé
Adapté de Chevalier, (2003)

Procédé d'obtention	Rugosité arithmétique : Ra (μm)												
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,001	
État de surface initial au brut													
Rectification													
Rectification de précision													
Rodage													
Polissage													
Superfinition													

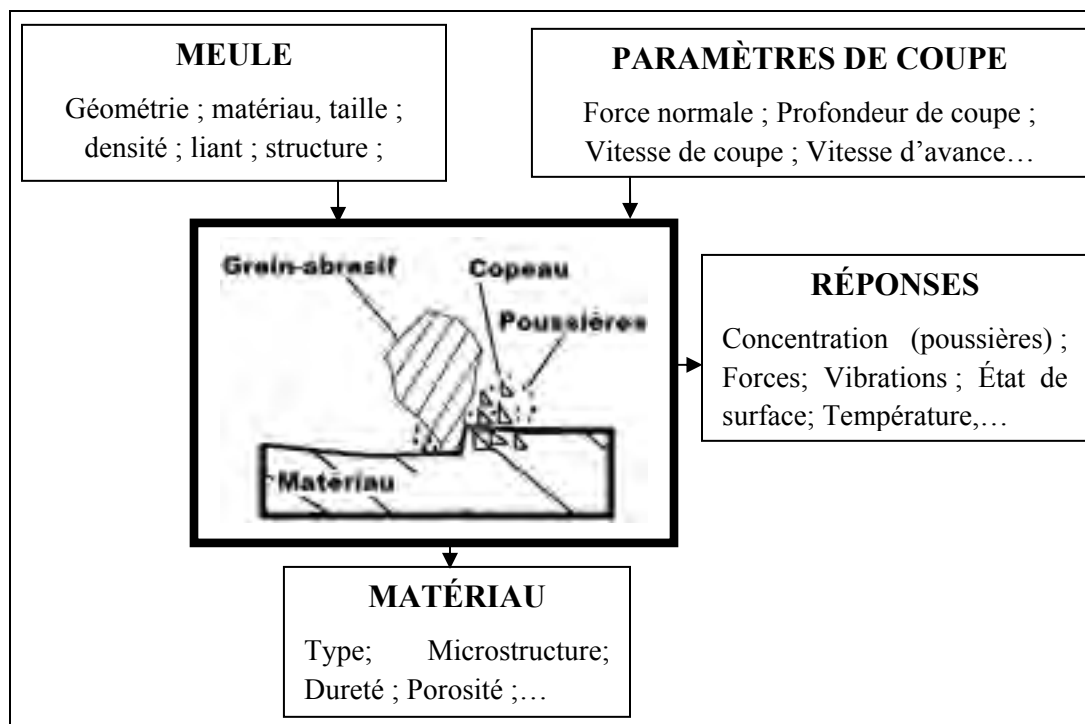


Figure 1.3 Modélisation du polissage
Adaptée de El-Hofy (2007, p.218)

1.1.2.2 L'émission des poussières au cours de l'usinage et du polissage

La physique du polissage diffère de la physique de l'usinage où l'outil de coupe a une géométrie définie. La meule se présente comme de micro-outils de coupe qui enlèvent successivement la matière à chaque passage. La complexité du polissage est liée au comportement mécanique des grains abrasifs qui, selon la géométrie enlève la matière différemment. Par contre en usinage conventionnel, Songmene et al (2008) montre que pour un outil de coupe à géométrie déterminée, les modes de génération des poussières sont connus pour les matériaux métalliques (6061-T6, A356, AZ91E et du laiton 70-30). Ils identifient cinq zones de génération des poussières (Figure 1.4). La première zone est celle du cisaillement primaire où les poussières sont générés par l'action du cisaillement du bec de l'outil de coupe sur la matière. Cette zone présente les températures les plus élevées. La deuxième zone se présente est très influencée par les grandes déformations et l'amorce de friction du copeau avec la face de coupe de l'outil. La troisième zone est le contact permanent la face de coupe de l'outil et le copeau. Ici, les poussières sont générées par le frottement et le mouvement du copeau ou de l'outil. La quatrième zone est délimitée par le contact de la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce. Les poussières sont produites par le frottement. La cinquième zone est le contact interne entre les parties du copeau éjecté par le mouvement de coupe. La génération des poussières se fait par le frottement interne surtout pour les copeaux longs. Cette description physique des modes de génération sont limités aux matériaux métalliques présentant une ductilité élevée. Dans le cas des matériaux fragiles usinés avec des outils de coupe conventionnels, Astakhov et al (1997) fournit une autre description qui rompt avec le modèle de Songmene et al (2008). Les auteurs font une distinction remarquable entre le mode de génération des outils à angle de coupe positif (Figure 1.5) et des outils à angle de coupe négatif (Figure 1.6). Les outils à angle de coupe positif ont tendance à réaliser le cisaillement de la matière alors que les outils à angle de coupe négatif écrasent la matière par une compression simple. Ainsi, dans le premier cas, les copeaux seront grossiers alors que pour le second cas les copeaux sont plus réduits en termes de tailles. Alors on peut parler de poussières qui peuvent se détacher et se disperser dans l'air ambiant. Les appareils de la qualité de l'air aspirent les poussières émises pour estimer les concentrations massiques ou les concentrations numériques.

Astakhov et al (1997) estiment que les outils à angle de coupe positif généreront moins de poussières totales que les outils à angle de coupe positif. Ces auteurs justifient leur résultat par la grosseur du copeau produit et le mode d'action de l'outil de coupe. Dans le cadre de la caractérisation des poussières d'usinage, Songmene et al (2008), Khettabi et al, (2009), et Zaghbani et al, (2009) ont également développé des modèles prédiction des poussières d'usinage exprimés sous la forme du «dust unit» défini comme le rapport entre la masse totale de poussières mesurée par la masse des copeaux.

1.1.2.3 Les méthodes de polissage, les abrasifs et les machines-outils

Marinescu et al (2004) distinguent notamment le meulage (ou grinding), la rectification (ou lapping), le rodage (ou honing) et le polissage (polishing) qui sont des procédés similaires. Le polissage se distingue des autres procédés par l'obtention d'une rugosité arithmétique très faible et d'une surface brillante. Le polissage passe par des opérations intermédiaires réalisées par des polisseuses automatiques, des polisseuses semi-automatiques et des polisseuses manuelles (Tableau 1.4). Le polissage utilise une bande abrasive (Figure 1.7a) ou une meule (Figure 1.7b) selon qu'on veut réaliser le polissage linéaire rectiligne ou le polissage pendulaire. Pour les essais de polissage, les mouvements combinés de l'outil de coupe rendent complexes l'étude de la génération des poussières c'est pourquoi, comme dans le tournage orthogonal, les chercheurs optent pour le polissage linéaire rectiligne. Ce type de polissage offre un avantage par rapport à la génération des poussières qui suivent la trajectoire rectiligne de la bande. Ce qui facilite à plus d'un titre l'échantillonnage des poussières émises. Les abrasifs de polissage sont en alumine (à 99 % cristallisée ou corindon blanc). Ils sont caractérisés par leur grade et leur taille (Tableau 1.5). Les abrasifs en alumine présentent des arêtes tranchantes et une excellente dureté (Debongnie, 2006). Ce qui convient au polissage des granites. Le renouvellement des faces tranchantes à chaque passage du grain abrasif facilite l'enlèvement de la matière.

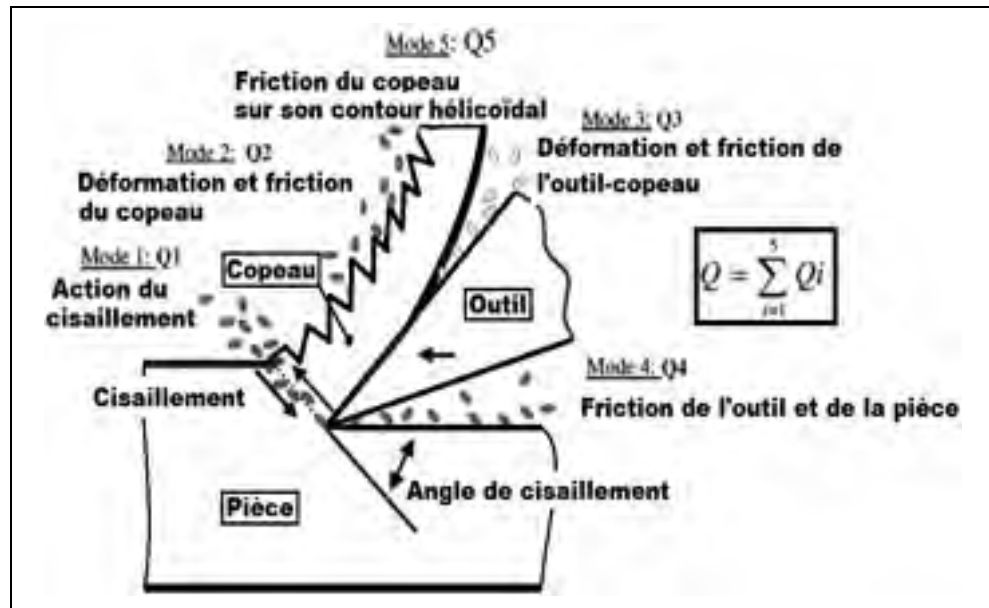


Figure 1.4 Modes de génération des poussières pour un outil de coupe
Tirée de Songmene et al (2008)

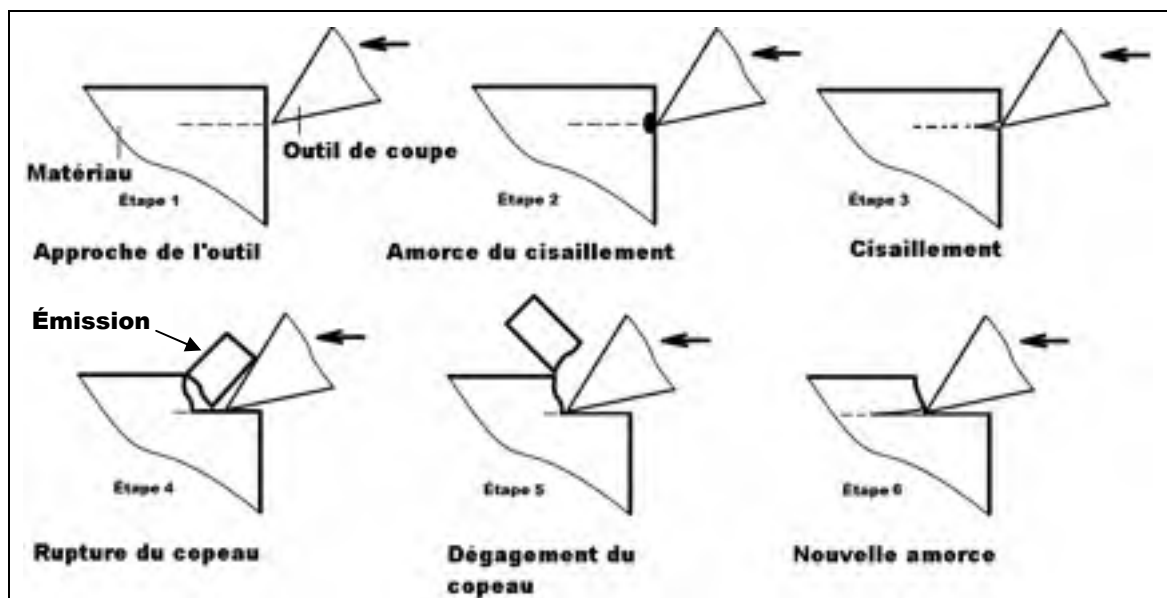


Figure 1.5 Formation de copeau et émission pour un outil à angle de coupe positif
Adaptée et traduite de Astahkov et al (1997)

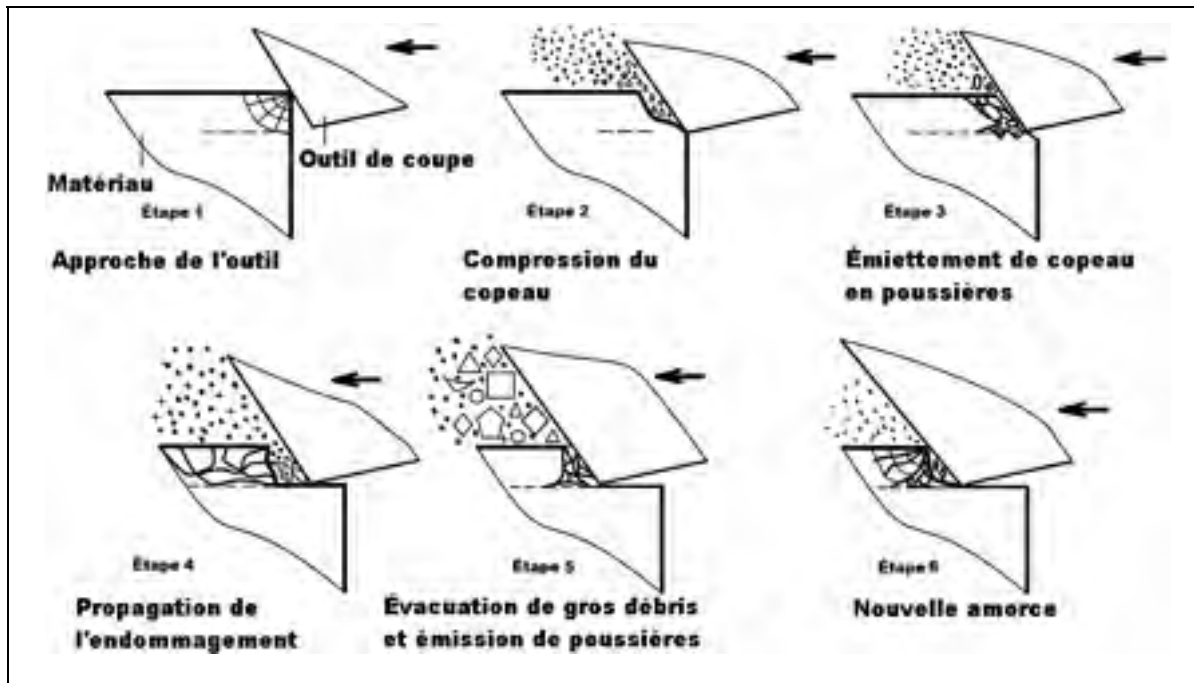


Figure 1.6 Formation de copeau et émission des poussières pour un outil à angle de coupe négatif Adaptée et traduite de Astahkov et al (1997)

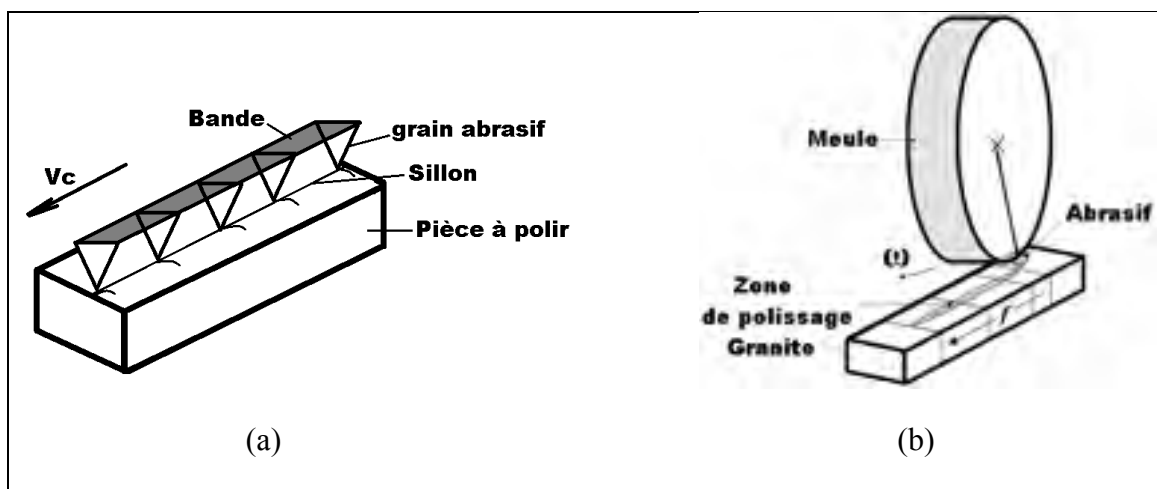


Figure 1.7 Opération de polissage : (a) linéaire rectiligne; (b) pendulaire

Tableau 1.4 Comparaison des polisseuses
Adapté de Marinescu, (2004)

Type	Avantages	Inconvénients	Caractéristiques
Manuelle	– état de surface miroir; – économique	– temps de polissage long; – opérations intermédiaires obligatoires; – réservés aux petites séries; – cadence de polissage limité à cause du facteur humain.	– vitesse de la broche en RPM; – diamètre de la broche; – puissance, consommation énergétique; – poids net, longueur, hauteur; – raccord; – niveau de vibrations $< 2,5$ m/sec²; – niveau sonore 97 db; – pression d'alimentation; – forte exposition des ouvriers aux poussières
Semi-automatique	– état de surface miroir; – possibilités de varier et de contrôler les paramètres de polissage; – temps de polissage moyen et contrôlable; – opérations intermédiaires non obligatoires	– réservés aux séries moyennes; – cadence de polissage acceptable; – émissions des poussières; – émissions vibratoires et acoustiques importantes	– vitesse de la broche en RPM; – diamètre de la broche; – puissance, consommation énergétique; – poids net, longueur, hauteur; – raccord; – niveau de vibrations entre 5 et 20 m/sec²; – niveau sonore 200 db; – pression d'alimentation; – moyenne exposition des ouvriers aux poussières
Robotisé	– état de surface miroir; – temps de polissage réduit de moitié et contrôlable; – cadence de polissage illimité; – adapté aux grandes séries	– procédé coûteux, émission des poussières; – très hautes émissions vibratoires et acoustiques; – surveillance permanente du procédé	– vitesse de la broche en RPM; – diamètre de la broche; – puissance, consommation énergétique; – poids net, longueur, hauteur; – raccord; – niveau de vibrations > 25 m/sec²; – niveau sonore > 500 db; – pression d'alimentation; – forte exposition des ouvriers aux poussières

Tableau 1.5 Désignation et taille des grains abrasifs
Adapté de Marinescu, (2004)

Macro-grille		Micro-grille	
Désignation	Taille (µm)	Désignation	Taille (µm)
P12	1815	P240	58.5 ± 2
P16	1324	P280	52.2 ± 2
P20	1000	P320	46.2 ± 1,5
P24	764	P360	40.5 ± 1,5
P30	642	P400	35.0 ± 1,5
P36	538	P500	30.2 ± 1,5
P40	425	P600	25.8 ± 1
P50	336	P800	21.8 ± 1
P60	269	P1000	18.3 ± 1
P80	201	P1200	15.3 ± 1
P100	162	P1500	12.6 ± 1
P120	125	P2000	10.3 ± 0,8
P150	100	P2500	8.3 ± 0,5
P180	82	P3000	5.0 ± 0,5
P220	68	P3500	2.5 ± 0,1

1.1.3 Échantillonnage des poussières d'usinage et de polissage

Le polissage des granites émet dans l'air ambiant des fortes concentrations de poussières. Leur échantillonnage est complexe dans le cadre de l'évaluation de la qualité de l'air et de l'estimation du taux d'émission par une source polluante. Les polisseuses manuelles présentent alors les cas les difficiles d'échantillonnage en raison de l'impossibilité d'associer une cage et une hotte d'aspiration. En outre, pour le polissage pendulaire les poussières sont projetées dans de multiples directions. Ce qui échappe aux dispositifs de captation et aux dispositifs d'échantillonnage. Pour résoudre le problème de l'échantillonnage à la source, WHO (1984) propose un éventail de solutions comportant l'échantillonnage direct, l'échantillonnage indirect, et l'échantillonnage mixte. Les deux premières sont exploitées pour de grosses productions industrielles en grandes séries alors que la troisième est utilisée pour des opérations de finition nécessitant une grande précision et la dextérité manuelle de l'ouvrier-finiisseur.

1.1.3.1 L'échantillonnage direct et l'échantillonnage indirect

L'échantillonnage direct comporte une source d'émission d'aérosol, un dispositif de transport, et un échantillonneur (Figure 1.8a). La source d'émission est généralement isolée de l'environnement extérieur par une cage. Le polluant est aspiré avec un débit constant à travers une pompe, puis canalisé vers l'appareil de mesure de la qualité de l'air. Le volume total d'échantillonnage est calculé à partir de la durée d'échantillonnage et du débit d'aspiration. Ce cas est adapté aux sources de pollution à faible concentration, à faible débit, à écoulement laminaire et isocinétique. Ses limites regroupent les pertes importantes d'aérosols, la difficulté de trouver la géométrie et les régimes d'écoulement adaptés à de meilleures conditions de transport des poussières, les fortes concentrations dues au cumul des aérosols dans la cage d'isolation, et les débordements de calibre pour certains appareils. L'échantillonnage indirect présente la même configuration que précédemment à la différence que la source d'émission n'est pas isolée de l'environnement (Figure 1.8b). La collecte des aérosols se fait à une distance éloignée de la source de pollution. Enfin, l'échantillonnage mixte associe simultanément l'échantillonnage direct et indirect (Figure 1.9). C'est un échantillonnage qui s'adapte aux mesures industrielles de terrain.

1.1.3.2 L'échantillonnage des poussières d'usinage de Songmene et al (2008)

Ce système d'échantillonnage spécialisé est utilisé pour caractériser les poussières d'usinage des matériaux métalliques (Figure 1.10). Ce dispositif comprend une cage de rétention de poussières ayant les dimensions de 30 x 30 x 30 cm, un tube d'aspiration horizontal, court et droit; un photomètre DUSTTRAK muni d'un impacteur 2.5 μ m. La concentration massique est mesurée au cours du temps et les courbes temporelles sont exploitées pour estimer les «poussières totales» et le «Dust unit». Khettabi et al (2009), Zaghbani et al (2009), Kouam et al (2012) ont utilisé cette méthode d'échantillonnage pour l'étude des émissions de poussières respectivement au tournage, au fraisage, et à la friction. Seuls les appareils d'échantillonnage ont été modifiés en fonction de leurs objectifs de caractérisation.

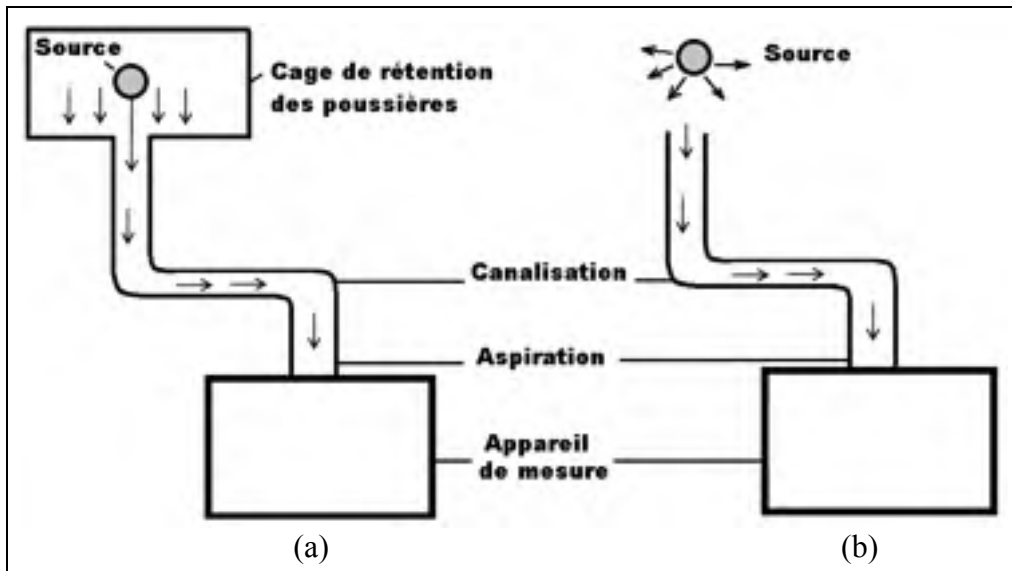


Figure 1.8 Échantillonnage de poussières: (a) directe; (b) indirecte
Adaptée de http://www.ifu.ethz.ch/IE/education/AQAM/SamplingInhalability_2013 consulté le 26/02/2014

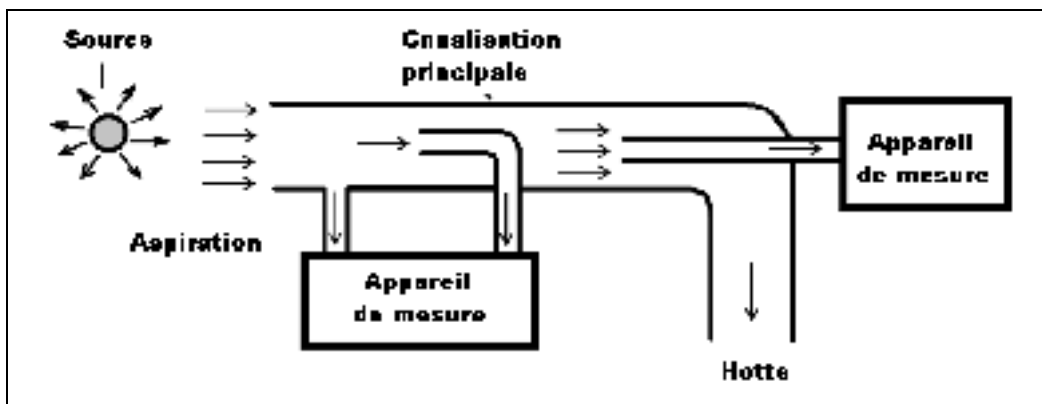


Figure 1.9 Échantillonnage mixte
Adaptée de http://www.ifu.ethz.ch/IE/education/AQAM/SamplingInhalability_2013 consulté le 26/02/2014

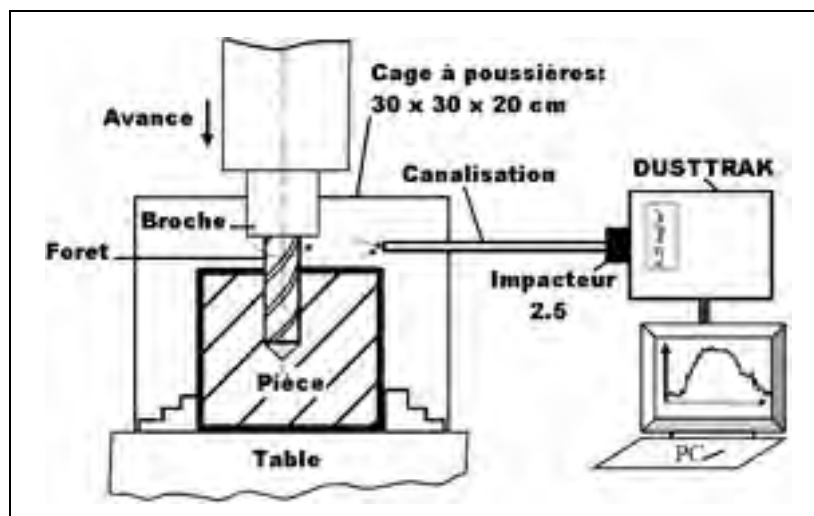


Figure 1.10 Dispositif d'échantillonnage
des poussières d'usinage
Tirée de Songmene et al (2008)

1.2 La dilution des poussières au cours de l'échantillonnage des poussières

La dilution consiste à injecter de l'air «propre» dans de l'air «pollué» (de concentration élevée) de manière à obtenir un mélange de concentration plus faible. Ce mélange peut se réaliser dans les intersections de tuyauterie, le rotor, et la chambre de dilution. La dilution n'a pas pour unique objectif de diminuer une concentration en particules, mais également de stabiliser les poussières pour éviter les phénomènes comme l'agglomération, la coalescence, la condensation, et la nucléation.

Le processus de dilution augmente l'efficacité des appareils de la qualité de l'air notamment les compteurs de particules optiques en diluant la concentration d'un aérosol afin d'empêcher leur saturation. Le défi majeur de la dilution est d'obtenir un facteur de dilution constant pour toutes les tailles de particules. La littérature présente une variété de modèles de dilution et de diluteurs.

1.2.1 Le modèle de facteur de dilution de Giechaskiel (2009 a, b)

Cet auteur a modélisé le facteur de dilution en exploitant l'hypothèse selon laquelle toute bonne dilution repose essentiellement sur les paramètres thermodynamiques notamment la pression, la température, la densité de l'air, la géométrie d'injection et les constantes adiabatiques (Figure 1.11).

1.2.1.1 Les hypothèses et les équations générales de dilution

Les hypothèses de modélisation sont :

- Les gaz entrants et sortants vérifient l'équation de continuité de Navier Stokes :

$$M_i = Q_i \rho_i \quad (1.1)$$

où $i = p, pr, s$. $\rho_i = 1.2 \text{ kg/m}^3$ dans les conditions standards (21°C et 1 atm)

- La somme des débits entrants est égale au débit sortant :

$$Q_s = Q_{pr} + Q_p \quad (1.2)$$

- Les pressions $P_{pr,2}$, $P_{p,2}$, P_s sont égales :

$$P_{pr,2} = P_{p,2} = P_s \quad (1.3)$$

- La géométrie spécifique d'injection impose une relation linéaire entre les pressions de l'«air propre» dans les positions 1 et 2 :

$$P_{pr,1} - P_{atm} = K(P_{pr,2} - P_{atm}) + (P_s - P_{atm}) \quad (1.4)$$

Où K : constante expérimentale de -1.2

Le facteur de dilution «débit» est le rapport entre le débit molaire du mélange à la sortie par le débit d'injection de l'air «pollué»:

$$DF_d = \frac{Q_s}{Q_p} = \frac{n_s}{n_p} = \frac{n_p + n_{pr}}{n_p} = 1 + \frac{n_{pr}}{n_p} = 1 + \frac{M_{pr}}{M_{Mol,pr}} \times \frac{M_{Mol,p}}{M_p} \quad (1.5)$$

$M_{Mol, pr}$: Masse molaire de l'air «propre»; $M_{Mol, p}$: Masse molaire de l'air «pollué».

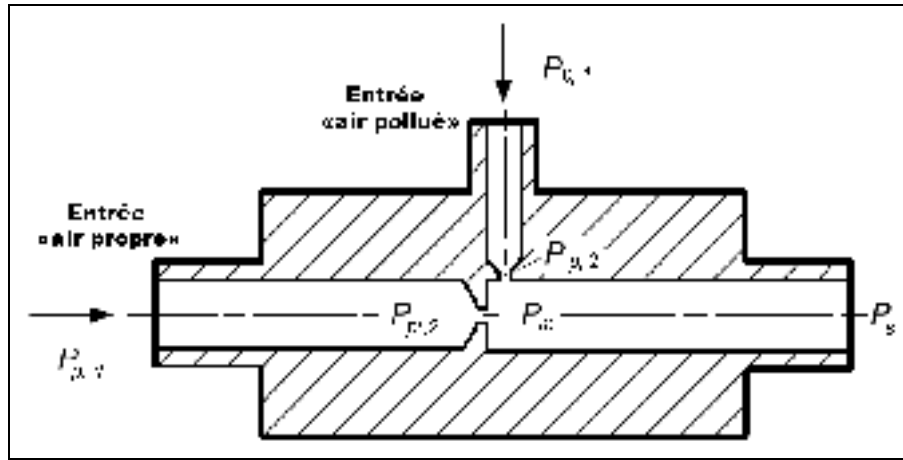


Figure 1.11 Croquis d'un diluteur à injection
Tirée de Giechaskiel (2009b)

1.2.1.2 Le modèle de facteur de dilution de Giechaskiel, (2009b)

Le facteur de dilution est une fonction de la composition du gaz, des pressions d'entrée et de sortie, et des températures d'entrée et de sortie. En exploitant les expressions du débit massique (M_{pr} et M_p) en fonction des facteurs influençant la dilution on obtient le modèle de prédiction suivant :

$$DF_D = 1 + \frac{K_{pr} \rho_{pr,1} A_{pr,2} \left(\frac{P_{pr,2}}{P_{pr,1}} \right)^{\frac{1}{\gamma_{pr}}} \left[\frac{2\gamma_{pr}}{\gamma_{pr} - 1} \times \frac{P_{pr,1}}{\rho_{pr,1}} \left(1 - \left(\frac{P_{pr,2}}{P_{pr,1}} \right)^{\frac{\gamma_{pr}-1}{\gamma_{pr}}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{K_p \rho_{p,1} A_{p,2} \left(\frac{P_{p,2}}{P_{p,1}} \right)^{\frac{1}{\gamma_p}} \left[\frac{2\gamma_p}{\gamma_p - 1} \times \frac{P_{p,1}}{\rho_{p,1}} \left(1 - \left(\frac{P_{p,2}}{P_{p,1}} \right)^{\frac{\gamma_p-1}{\gamma_p}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \times \frac{M_{Molp}}{M_{Molpr}} \quad (1.6)$$

Où K_{pr} et K_p : constantes expérimentales respectivement 0.77, 0.86; ρ_{pr} : Masse volumique de l'air «propre»; ρ_p : Masse volumique de l'«air pollué»; A_{pr} , A_p : Sections d'injection respectives de l'air «propre» et l'air «pollué»; P_{pr} , P_p : Pressions d'injection respectives de l'air «propre» et l'air «pollué»; γ_{pr} , γ_p : Constantes adiabatiques respectives de l'air «propre» et l'air «pollué». Le modèle de Giechaskiel, (2009b) n'est applicable que pour des fumées ayant des pertes négligeables d'aérosols. Le facteur de dilution n'est influencé que par les paramètres thermodynamiques liés à l'écoulement.

1.2.2 Le modèle de facteur de dilution de Collins (2010)

Collins (2010) a proposé un modèle de facteur de dilution exploitant l'hypothèse selon laquelle toute bonne dilution repose essentiellement sur les paramètres de concentrations numériques et sur la conservation numérique du système de dilution.

1.2.2.1 Les hypothèses et les équations générales de dilution des particules

Les hypothèses sont les mêmes que ceux de Giechaskiel, (2009b). L'équation 1.7 permet la comptabilisation numérique des aérosols dans le système de dilution. La somme numérique de particules contenues dans l'air «pollué», de particules contenues dans l'air «propre», de particules générées par unité de temps, soustrait de particules perdus par les effets de la dilution est égale au nombre de particules comptabilisés en sortie du diluteur :

$$C_{p,di} Q_p + C_{pr,di} Q_{pr} + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{coag_evap,di} - C_{perd,di} = C_{S,di} Q_S \quad (1.7)$$

Les auteurs Maricq et al (2001), Kittelson et al (2000), Abdul-Khalek et al (1999) ont montré que les pertes numériques d'aérosols pouvaient influencer le résultat de la dilution des aérosols. Hinds (1999) présente les cinq mécanismes susceptibles d'entraîner une déposition de particules sur les parois d'un tube d'échantillonnage. L'auteur distingue notamment la sédimentation, la thermophorèse, l'attraction électrique, l'impaction inertielle et la diffusion. Les facteurs influençant les pertes numériques d'aérosols sont la phase de l'aérosol (solide ou liquide), la charge électrique de l'aérosol et des parois du tube, le flux libre de la vitesse de l'écoulement au moment de l'aspiration, la vitesse de l'écoulement, le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), la présence d'une zone de perte de charge singulière (coude, réduction, té), la taille, la forme et la densité de l'aérosol. Les particules de taille comprise entre 20 et 100 nm sont difficilement échantillonnées dans un système de dilution alors que cette opération est relativement facile pour les tailles comprises entre 100 et 1000nm. Par contre, l'échantillonnage des particules de tailles supérieures à 1000 nm présente la même complexité que les tailles comprises entre 20 et 100 nm.

Pour illustrer les difficultés de l'échantillonnage par dilution, Delattre et Friedlander (1978) ont estimé les pertes numériques des aérosols dans le tube capillaire d'un diluteur à filtres. Leurs résultats ont montré que les pertes d'aérosols de taille respectives de 10 nm et 15 nm sont estimées à 17 % et à 8%. Brockmann et al (1984) ont utilisé l'équation de Gormley et Kennedy (1949) pour prédire les pertes d'aérosols par diffusion dans un diluteur à capillaire, mais leurs résultats restent limités aux particules de l'ordre du micromètre. Chen et al (2007) ont montré que les pertes dans un diluteur à filtres avec capillaire restent négligeables pour les particules de taille inférieure à 2 nm. Dans leur étude portant sur la dilution des fumées, Abdul-Khalek et al (1999) ont vérifié que la température et l'humidité de dilution peuvent entraîner des phénomènes complexes tels que : l'agglomération rapide des aérosols, l'acquisition des charges électriques, l'attraction électrique des aérosols, les collisions éventuelles créées par la turbulence de l'écoulement. Brockhorn (1994) et Gulder (1999) ont confirmé que l'augmentation du temps de séjour avait des effets directs sur les aérosols de l'ordre de 1 nm. En effet, ce paramètre donne la possibilité aux petites particules de grossir pour augmenter le nombre de grosses particules. Baumgard et Johnson (1996) ont remarqué que les particules ultrafines dont la taille ne dépasse pas 50 nm sont les plus affectés par l'écoulement turbulent qui accélère la coagulation. Globalement, il ressort de la plupart des auteurs que les pertes numériques d'aérosols dans un diluteur sont largement influencées par la température, l'humidité, les charges électriques, le temps de séjour et la géométrie du volume de dilution. Dans ce cadre, Noble et al, (2005) propose le choix d'un matériau approprié des diluteurs afin de minimiser les pertes numériques d'aérosols (Tableau 1.6).

Tableau 1.6 Niveau d'efficacité de réduction de pertes d'aérosols par les charges électriques (1- Excellent, 2- Très bien, 3- Bien, 4- Assez Bien, 5- Passable, 6- Faible, 7- Très faible, 8- mauvais)
Tirée de Noble et al (2005)

Niveau d'efficacité	Matériau	Niveau d'efficacité	Matériau
1	Acier inoxydable	5	Cuivre
2	Bel-A-Line	6	Polyéthylène
3	Polyester	7	Verre
4	Polyester vinyle doublé	8	Téflon

1.2.2.1 Le facteur de dilution numérique pour des pertes négligées

Le facteur de dilution numérique est estimé en admettant les hypothèses suivantes :

- l'«air propre» est sans impuretés ($C_{pr, di} = 0$);
- les effets de la coagulation et d'évaporation sont négligés : $\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{coag_evap, di} = 0$;
- les pertes de particules sont négligées ($C_{perd, di} = 0$);
- la conservation des débits dans le système est appliquée : $Q_s = Q_{pr} + Q_p$

Le facteur de dilution calculé à partir de la concentration numérique est défini à partir de l'équation 1.8. Sa transformation donne à l'équation 1.9 la définition du facteur de dilution numérique qui est le rapport de la concentration numérique de l'air «pollué» par la concentration numérique du mélange à la sortie du diluteur.

$$C_{p, di} Q_p = C_{s, di} Q_s \quad (1.8)$$

$$\Rightarrow DF_{p, di} = \frac{C_{p, di}}{C_{s, di}} = \frac{Q_s}{Q_p} \quad (1.9)$$

1.2.2.2 Le facteur de dilution volumique ou le facteur de dilution «débit»

Le facteur de dilution calculé à partir du débit volumique est le rapport du débit volumique du mélange à la sortie du diluteur par le débit volumique de l'air «pollué» injecté. Lorsque les pertes d'aérosols sont négligées, le facteur de dilution numérique est égal au facteur de dilution volumique

$$DF_v = \frac{Q_s}{Q_p} = \frac{Q_p + Q_{pr}}{Q_p} \quad (1.10)$$

1.2.2.3 Le facteur de dilution numérique avec des pertes de particules non négligeables

Lorsque le système de dilution entraîne des pertes de particules : ($C_{\text{perd,di}} \neq 0$), l'équation 1.7 devient l'équation 1.11 :

$$\frac{C_{S,di}}{C_{p,di}} \left(\frac{Q_p + Q_{pr}}{Q_p} \right) = 1 - \frac{C_{\text{perd,di}}}{C_{p,di} Q_p} \quad (1.11)$$

Le facteur de dilution numérique est proportionnel au facteur de dilution volumique. Il s'exprime par l'équation 1.12 :

$$DF_{p,di} = \frac{DF_v}{1 - \frac{C_{\text{perd,di}}}{C_{p,di} Q_p}} \quad (1.12)$$

1.2.2.4 La pénétration d'un aérosol avec des pertes non négligeables

La pénétration de l'aérosol dans le système de dilution est estimée par le rapport entre le facteur de dilution volumique et le facteur de dilution numérique. La Figure 1.12 montre pour un diluteur donné, le comportement du facteur de dilution volumétrique, du facteur de dilution concentration et de la pénétration. Le facteur de dilution particulaire augmente avec la réduction de la taille des particules. La pénétration de dilution résultant diminue à mesure que les valeurs de la dilution et de la dilution volumétrique de particules divergent. Deux cas se présentent notamment la situation où $P_{p,di} < 1$ (le système de dilution perd les particules avec une augmentation du facteur de dilution «concentration» par rapport au facteur de dilution «débit»; et la situation où $P_{p,di} > 1$ (le système de dilution décrit une génération de particules qui se produit de telle sorte que le facteur dilution «concentration» qui en résulte est inférieure au facteur de dilution «débit» :

$$P_{p,di} = \frac{DF_v}{DF_{p,di}} = 1 - \frac{C_{\text{perd,di}}}{C_{p,di} Q_p} \quad (1.13)$$

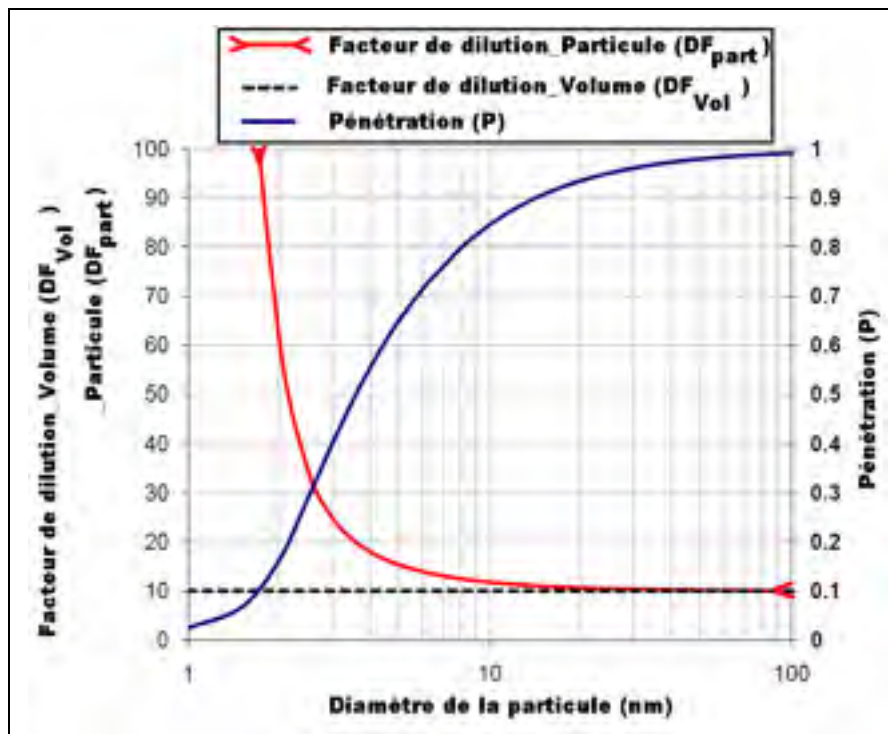


Figure 1.12 Graphique des facteurs de dilution et de la pénétration en fonction du diamètre de la particule
Tirée de Collins (2010, p.6)

1.2.3 Les types de diluteurs

Les diluteurs sont conçus selon l'utilisation et la typologie des aérosols. Les diluteurs sont multiples et se distinguent selon leur modèle de conception. Ainsi, on a le modèle à résidence pour les aérosols atmosphériques, le modèle à injection, le modèle à filtre pour les aérosols secs, le modèle à rotor pour les gaz et les fumées, et le modèle à volume constant pour tous les aérosols variés. Chaque type de diluteur s'adapte à une situation d'échantillonnage donné. En général le facteur de dilution maximal est recherché afin de mieux conditionner les aérosols avant leur échantillonnage. Dans tous les cas, les diluteurs dépendent du type particules et de leur taille.

1.2.3.1 Le diluteur à résidence

Dans ce système de dilution utilisé pour les émissions atmosphériques, une partie de l'échappement s'écoule dans une conduite chauffée. Le débit est mesuré et le mélange se fait dans une chambre de résidence proche des conditions environnementales de la troposphère. Le temps de séjour est compris entre quelques dizaines de secondes à plusieurs minutes. Ce modèle permet la caractérisation des aérosols organiques à des concentrations très faibles. L'innovation de ce système est le temps relativement long entre la dilution et l'échantillonnage. Ce temps de résidence de l'ordre de la dizaine de secondes à quelques minutes permet aux aérosols de subir toutes les transformations atmosphériques. On distingue le diluteur de Hidelmann, (1989) (Figure 1.13), le diluteur DRI du CERP, (2004) (Figure 1.14), et le diluteur CMU de Lipsky et al, (2002) (Figure 1.15).

1.2.3.2 Le diluteur à injection

Le diluteur à injection exploite la géométrie de l'intersection d'injection pour faciliter le mélange de l'air «pollué» et l'«air propre» (Figure 1.16). DEKATI (2003) et Giechaskiel (2009b) ont proposé deux modèles de dilution à injection : le modèle à té et le modèle poreux. Dans le modèle à té, le flux de dilution est fourni par une source d'air comprimé qui exploite la géométrie de l'intersection pour mélanger les deux fluides. L'hypothèse fondamentale est que la dilution est spatialement homogène dans l'écoulement sortant de la buse de mélange. Il résulte de cette hypothèse que les concentrations sont identiques dans l'échantillon prélevé. Dans le modèle poreux (Figure 1.17), l'«air propre» sous pression est injecté à travers une cavité poreuse qui distribue l'«air propre» dans l'écoulement principal l'aérosol en minimisant le phénomène de turbulence par micro-jet. Desante et al (2011) ont étudié les sources de variabilité dans les tailles de particules mesurées en utilisant un système dilution par injection, d'un tunnel de mélange et du SMPS. Le modèle de diluteur DEKATI FPS-4000 a été couplé à un moteur à combustion afin de mesurer les variations dans les distributions de taille des particules en fonction des conditions de dilution. Le facteur de dilution primaire était dans une plage de 3 à 20 alors que le facteur de dilution secondaire variait de 7 à 15. Le facteur de dilution globale était compris entre 20 et 200.

D'autres diluteurs, avec le même principe, sont proposés dans la littérature, notamment le diluteur PALAS où l'injection se fait par un orifice annulaire autour de la buse, le diluteur de mélange possède deux chambres reliées par un minuscule orifice (Figure 1.18). Yoong et al. (2005) ont étudié les performances d'un système de dilution à venturi pour la mesure des concentrations d'aérosols au-delà de 10^6 # /cm^3 . Les résultats ont montré une bonne pénétration des particules (95% pour les tailles de 3 à 20 nm) et un facteur de dilution de 17,4. Le diluteur à injection malgré ses conceptions variées présente toujours une évacuation de l'excès de mélange au regard des débits élevés du mélange pour s'accommoder aux débits d'échantillonnage faibles des appareils de mesure (de l'ordre de 1.5 LPM).

1.2.3.3 Le diluteur à filtres

Collins (2010) a développé un diluteur à filtre utilisant un filtre HEPA munie d'un capillaire (Figure 1.19). Il a également étudié les pertes d'aérosols pour ce type de diluteur, où il est ressorti que le diluteur à filtres ne convient pas pour les aérosols humides. Fuchs et Sutugin (1965) ont développé un diluteur à filtre simple pouvant atteindre un facteur de dilution de 6400. Dans le deuxième modèle l'aérosol subit une bifurcation ou bypass pour être épuré par au moins un filtre pour produire de l'«air propre» qui est ensuite mélangé à l'«air pollué» pour obtenir un mélange dilué. Le modèle 3302A de TSI (TSI, 2014a) et le modèle TOPAS (Figure 1.20) disposent d'un ou plusieurs filtres selon le maximum de facteur de dilution désiré. L'écoulement à la suite du filtre est contrôlé par l'intermédiaire d'une restriction de position amovible. L'augmentation de la restriction à l'écoulement se traduit par une augmentation du débit de dilution à travers le filtre. La diminution de la restriction entraîne une augmentation du débit dans le capillaire. La limitation de la pression dans ce dispositif est imposée un tube capillaire de 0.14 cm de diamètre avec une longueur totale de 13.4 cm. Cette limitation de la pression entraîne une augmentation de l'écoulement à travers deux filtres HEPA placés en parallèle. La présence de la vanne permet la chute de pression le long de l'écoulement d'air filtré qui peut être augmentée ou diminuée par réglage de la valve. La chute de pression entraînant un écoulement variable à travers le capillaire, permet d'obtenir un facteur de dilution variable par la modification de la chute de pression.

Kittelson et al. (2002) a développé un diluteur à filtre similaire à celui de Fuchs et al (1965), pour mesurer la concentration des aérosols émis par un moteur diesel, en utilisant un compteur de particules de condensation (CPC). Knibbs et al. (2007) ont présenté un diluteur à filtre-capillaire simple, peu coûteux pour la dilution du CPC TSI #3007 qui ne pouvait mesurer que des concentrations ne dépassant pas $8 \times 10^5 \text{ \# /cm}^3$. Ces auteurs ont estimé l'efficacité du système de dilution en utilisant une concentration d'aérosols très élevée en provenance d'une combustion. Le facteur de dilution volumique a été estimé par des mesures directes des débits au cours de l'écoulement à travers le diluteur.

1.2.3.4 Le diluteur à rotor

Le modèle 379020A de TSI (Figure 1.21) utilise un disque tournant ou rotor chauffé au cours du processus de dilution. Les disques comprennent huit cavités à dix cavités qui emprisonnent l'air propre de l'injectant en microquantité dans la tuyauterie de passage de l'«air pollué». Le modèle de Giechaskiel (2010) permet de sélectionner le facteur de dilution de 15 à 3000 (Figure 1.22). Pour le modèle GRIMM type MD 19-2E et le modèle DMS500 (Figure 1.23) fonctionnent selon le même principe que celui de Giechaskiel (2010) avec 2 à 10 cavités.

$$DR_v = \frac{1}{DF_v} = \frac{Q_g}{Q_{pr}} \quad (1.14)$$

Or $Q_g = V_c n_c f$, le taux de dilution est estimé par la formule suivante :

$$DR_v = \frac{1}{DF_v} = \frac{V_c n_c f}{Q_{pr}} \quad (1.15)$$

DR_v est le taux de dilution volumique, DF_v est le facteur de dilution volumique, Q_g est le volume d'«air pollué» prélevé par seconde, V_c est le volume de la cavité, n_c est le nombre de cavités, f est la fréquence de rotation du disque. Le facteur de dilution maximal peut atteindre 10000 pour 2 cavités et un débit d'«air propre» de 5 LPM (Figure 1.24).

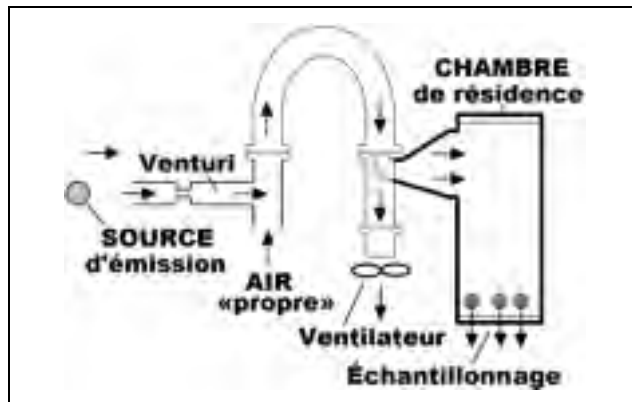


Figure 1.13 Croquis du diluteur à résidence
Tirée de Hidelmann, (1989)

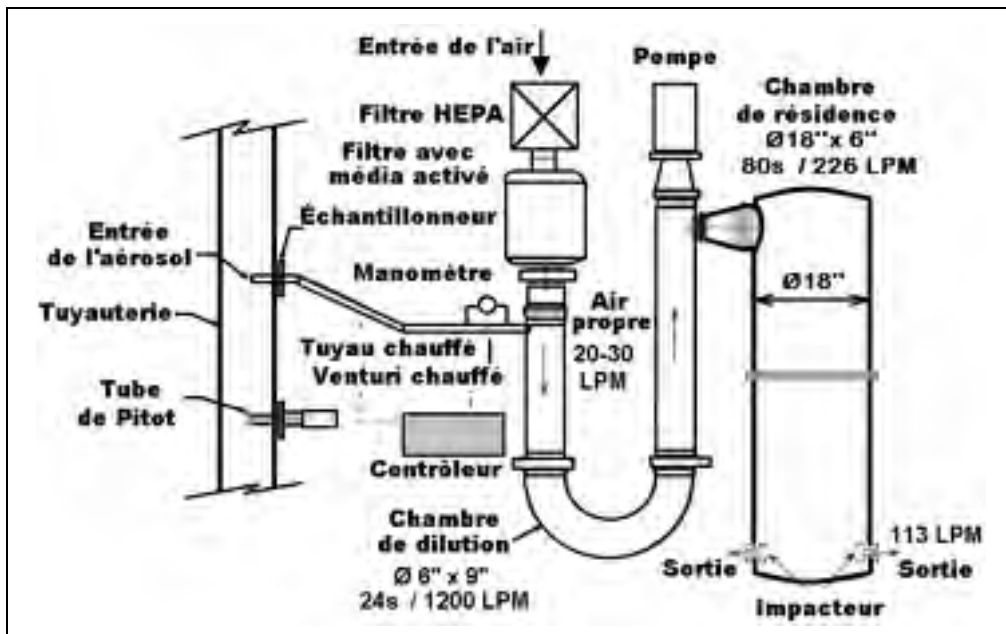


Figure 1.14 Croquis du diluteur à résidence DRI
Tirée de CERP, (2004)

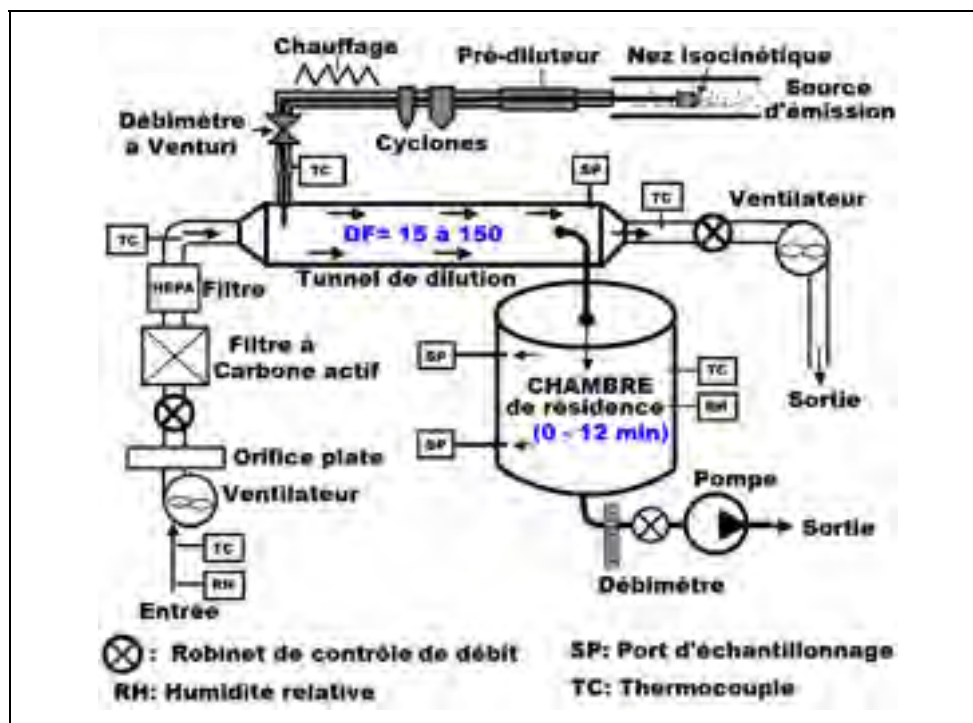


Figure 1.15 Croquis du diluteur à résidence avec conditionnement
Tirée de Lipsky et al, (2002)

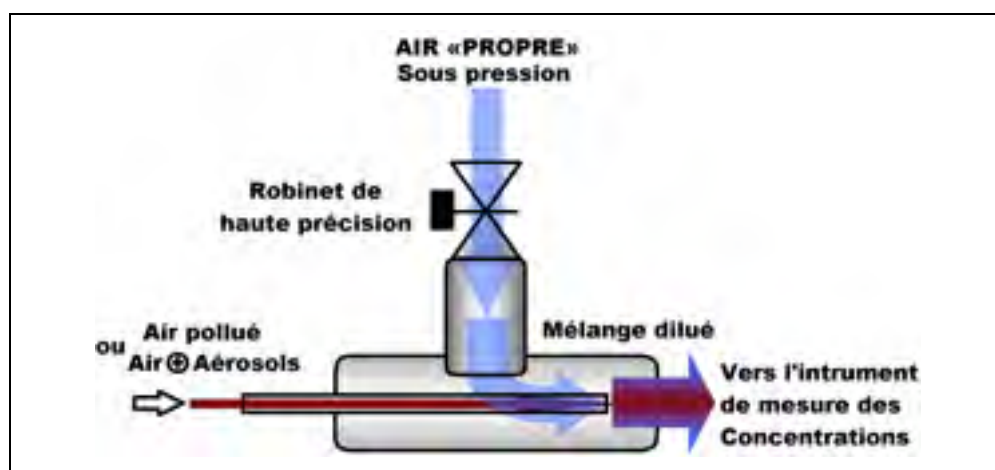


Figure 1.16 Croquis d'un diluteur à injection avec
une section de mélange
Tirée de DEKATI, (2003)

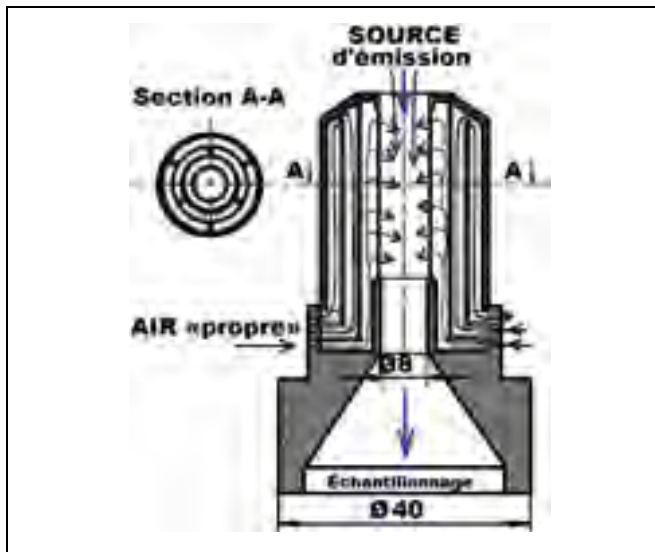


Figure 1.17 Croquis d'un diluteur à injection multi-sections
Tirée de DEKATI, (2003)

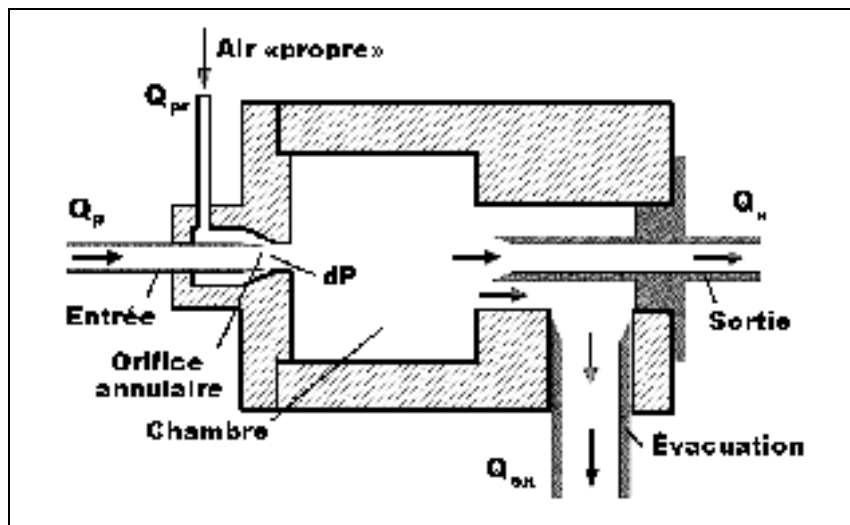


Figure 1.18 Croquis d'un diluteur à injection PALAS
Adaptée de www.palas.com
consultée le 28/02/2014

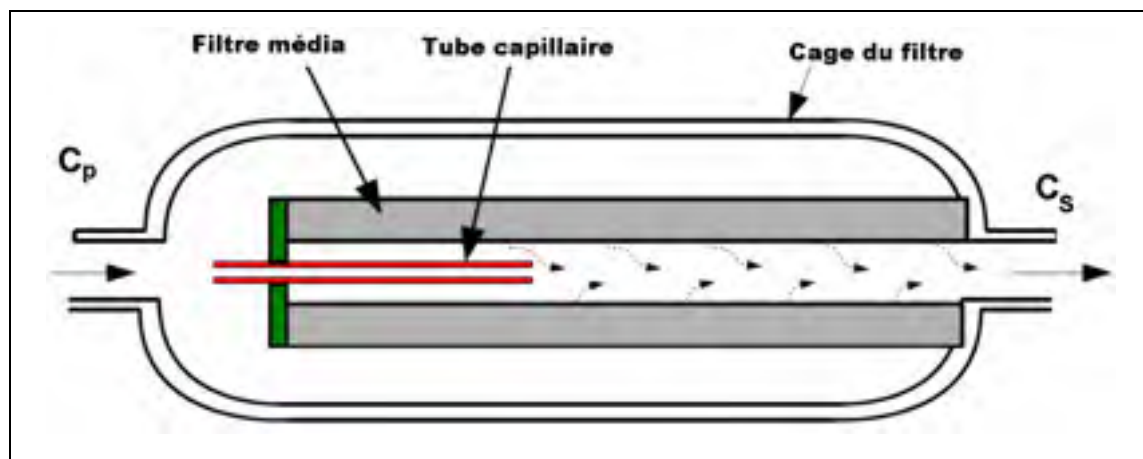


Figure 1.19 Croquis d'un diluteur à filtre de Collins
Tirée de Collins (2010, p.30)

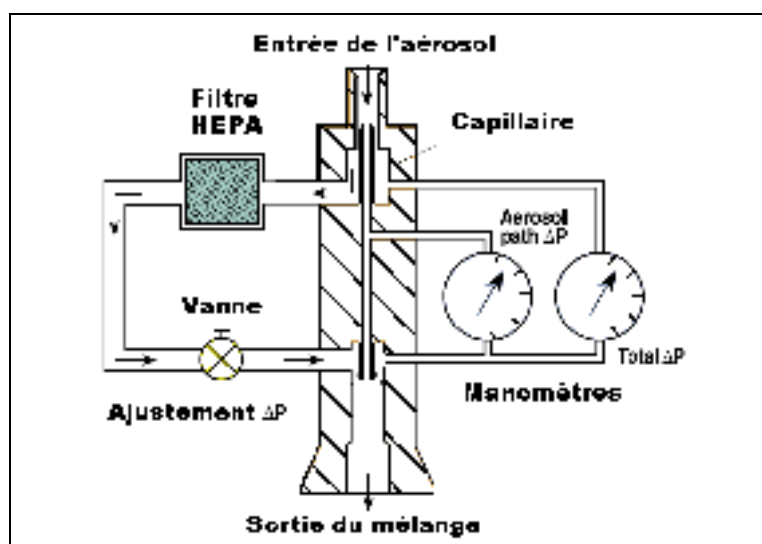


Figure 1.20 Croquis d'un diluteur à filtre TSI et TOPAS
Tirée de www.tsi.com et de www.topas-gmbh
consultée le 28/02/2014

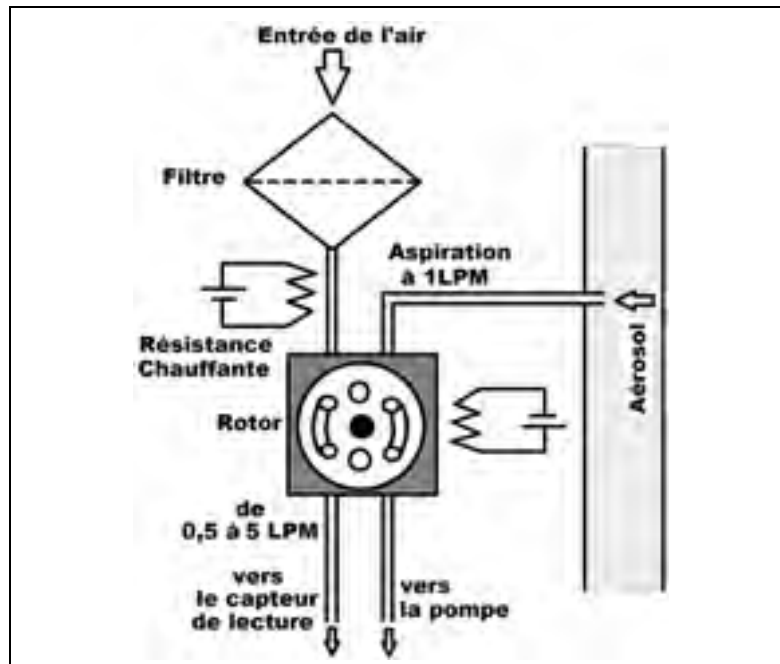


Figure 1.21 Diluteur à rotor de TSI modèle #379020A
Adapté de www.tsi.com
consultée le 28/02/2014

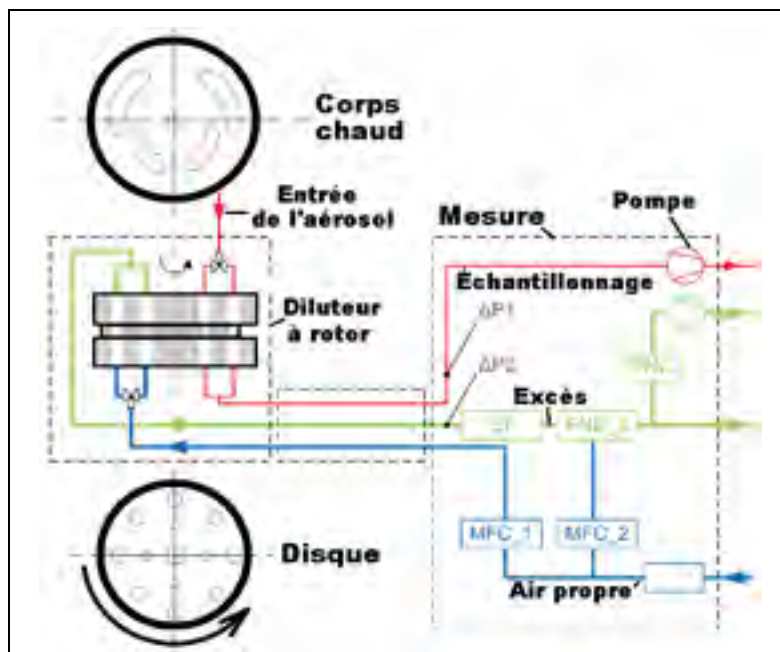


Figure 1.22 Diluteur à rotor de Giechaskiel
Tirée de de Giechaskiel (2010)

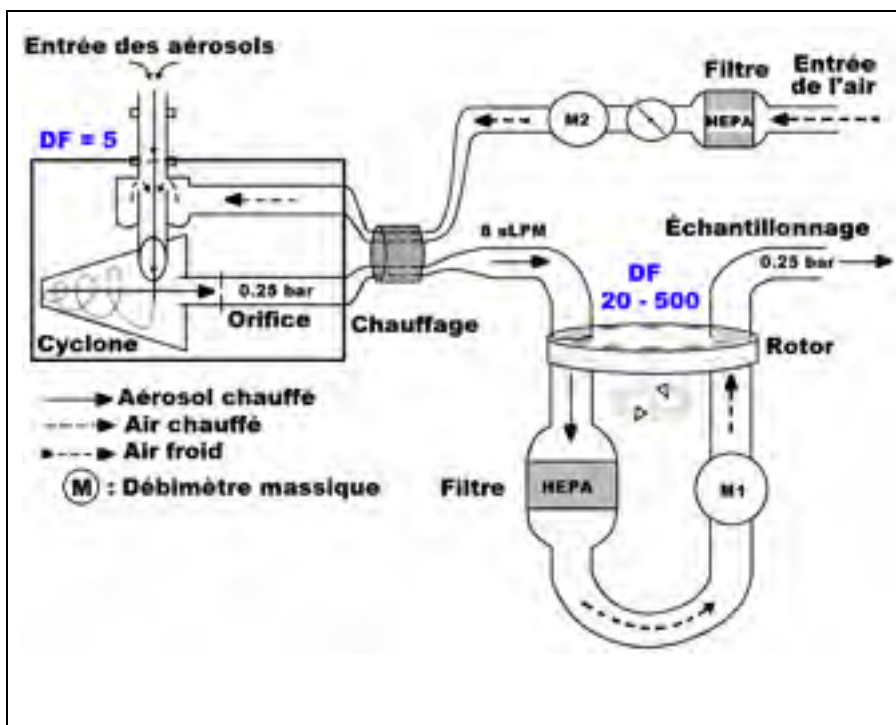


Figure 1.23 Diluteur à rotor CAMBUSTION-DMS 500
Tirée de www.cambustion.com
consulté le 28/02/2014

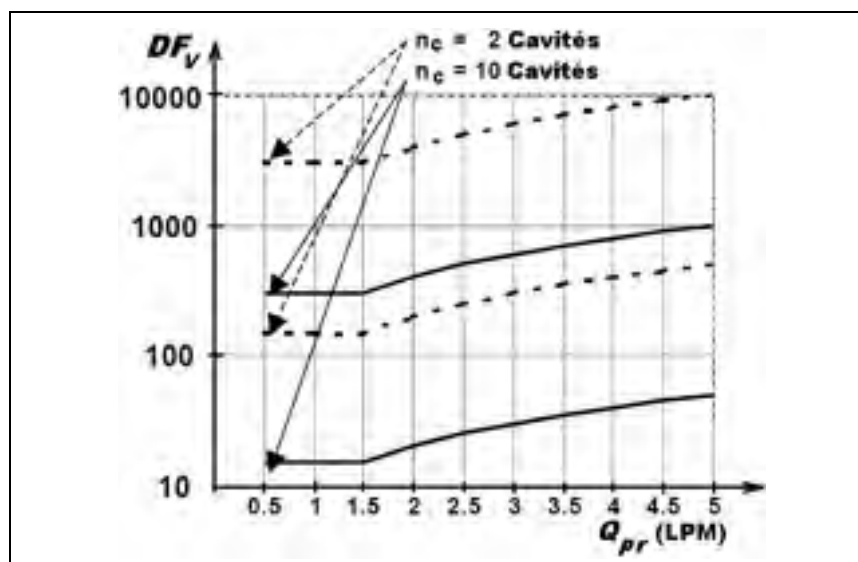


Figure 1.24 Graphique du facteur de dilution du diluteur à rotor
Tirée de www.cambustion.com
consulté le 28/02/2014

1.2.3.5 Le diluteur à volume constant et l'étude comparative des diluteurs

Ce modèle dispose d'un volume total constant capable d'assurer le mélange et la dilution de l'échantillon. L'«air pollué» et l'«air propre» sont injectés en continue dans le volume de dilution dans lequel le mélange peut se faire par la turbulence. Le débit de l'air «pollué» émis par une source et le débit de l'air «propre» sont susceptibles d'être variés en fonction du facteur de dilution à obtenir pour un bon échantillonnage par l'appareil de mesure de la qualité de l'air. Pour certains cas, un dispositif chauffant est positionné à l'entrée de l'aérosol pour le conditionner et absorber l'humidité. Le volume de dilution peut être précédé d'un tunnel de dilution (Figure 1.25). Par ailleurs, d'autres modèles privilégient la direction d'injection comme meilleur facteur de mélange des jets (Figure 1.26a). Dans ce cas le débit de l'«air propre» peut être divisé en deux parties égales et injectée dans le volume de dilution par une direction orthogonale par rapport à la direction d'injection de l'«air pollué».

Brockmann et al (1984) ont développé un diluteur à volume constant utilisant essentiellement deux approches de dilution. La première approche utilise un prélèvement total de l'aérosol et une injection au centre de l'écoulement de l'air «propre» (Figure 1.26b). Cette approche est conseillée pour des débits faibles d'air «pollué» et les résultats permettent d'obtenir des facteurs de dilution très élevés de l'ordre de 500 à 10000. En effet, par un débit extrêmement faible de l'air «pollué», l'entraînement du jet d'«air propre» permet de diffuser l'aérosol rapidement dans le volume de mélange. Mais il faut, une vanne de précision au centième et un débitmètre de précision pour obtenir ces débits faibles d'air «pollué» et une évacuation en sortie pour des grands débits d'air «propre». La deuxième approche propose un prélèvement partiel de l'aérosol et une injection dans le volume de dilution (Figure 1.28). Cette approche est conseillée pour des débits élevés d'air «pollué» et les résultats permettent d'obtenir des facteurs de dilution variant de 300 à 4000. Le mélange air «pollué» et air «propre» entièrement échantillonné à la sortie du diluteur. Un filtre est prévu pour retenir les particules et évacuer l'air non pollué. La comparaison des diluteurs se fera en présentant les avantages et les inconvénients de chaque dispositif (Tableau 1.7). Les avantages énumèrent les points positifs dans la géométrie, dans l'utilisation et dans le fonctionnement. Les inconvénients permettent d'identifier les limites de chaque diluteur.

Cette comparaison est faite sur les diluteurs précédents à savoir : le diluteur à résidence, le diluteur à injection, le diluteur à rotor, le diluteur à filtre, et le diluteur à volume. De manière globale, chaque diluteur s'adapte à l'échantillonnage d'un type d'aérosol particulier. Le diluteur à volume constant s'adapte à toutes les situations d'échantillonnage des aérosols et est considéré par l'EPA comme le diluteur agréé par excellence. Cette comparaison prend en compte les caractéristiques majeures des diluteurs qui peuvent s'appliquer dans de multiples conditions d'échantillonnage. Les diluteurs peuvent également être montés en parallèle ou en série pour maximiser le facteur de dilution.

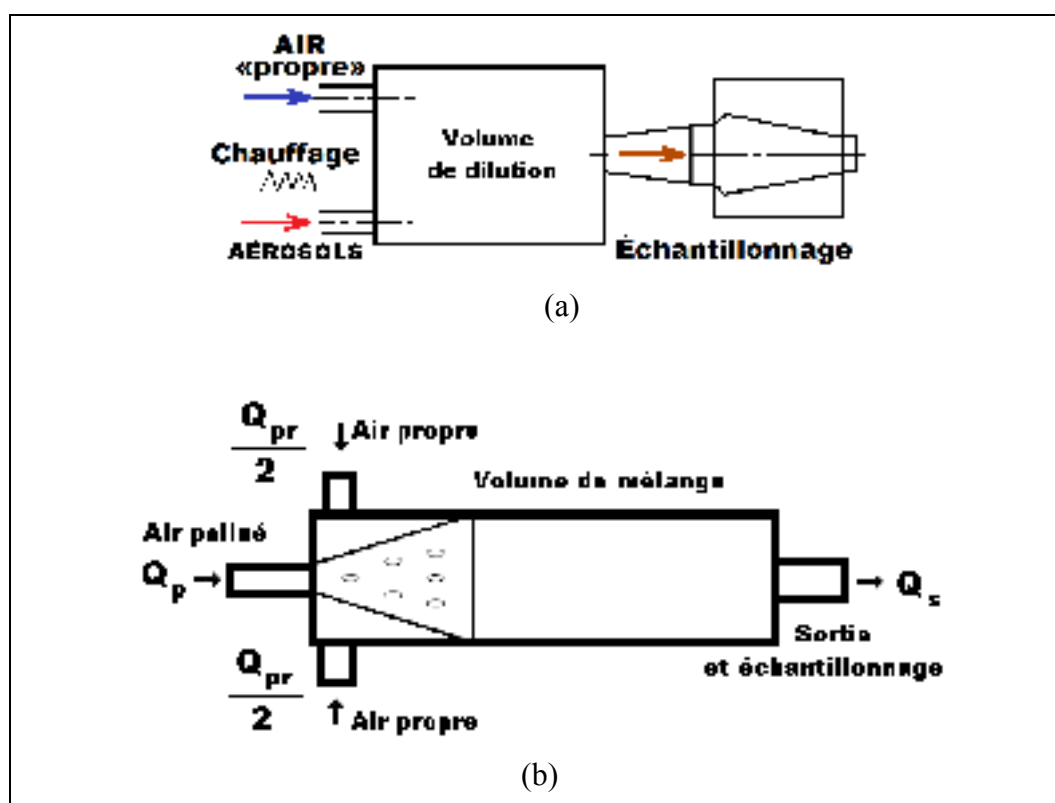


Figure 1.25 Croquis du diluteur à volume constant : (a) injection parallèle;
(b) injection orthogonale
Adaptée de Kelly et al (2006)

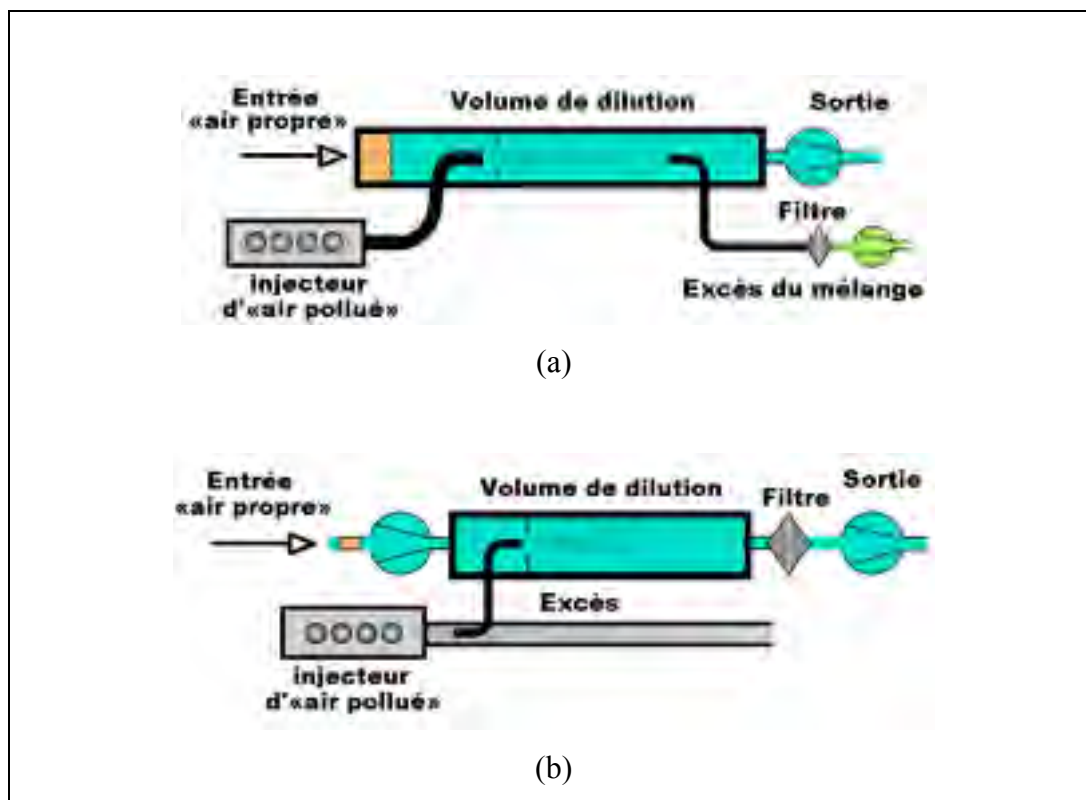


Figure 1.26 Croquis du diluteur à volume constant : (a) injection complète;
(b) injection partielle
Adaptée de Brockmann et al (1984)

Tableau 1.7 Comparaison des systèmes de dilution des aérosols
Adapté de Kelly et al (2006)

Diluteur/ Références	Avantages	Inconvénient
Diluteur à résidence Hidelmann (1989), Lipsky et al, 2002)	- haut débit; - excellent mélange; - dilution complète; - échantillonnage à température ambiante; - conditionnement idéal	- encombrant et coûteux; - nettoyage obligatoire; - temps de séjour long; - système très complexe; - surveillance permanente des fuites.
Diluteur à injection Giechaskiel et al (2009), Dekati (2003)	- miniaturisé; - temps de séjour court; - transportable et moins cher; - réalisation et utilisation facile.	- chutes de pression; - contrôle des flux; - bouchage; - nettoyage obligatoire.

Tableau 1.8 Comparaison des systèmes de dilution des aérosols
Adapté de Kelly et al (2006)

Diluteur/ Références	Avantages	Inconvénient
Diluteur à rotor CAMBUSION, GRIMM	- portable, - nettoyage facultatif; - excellente dilution pour les gaz et les particules ultrafines.	- prix élevé; - système complexe; - surveillance permanente des paramètres de dilution (température, pression, débits,...).
Diluteur à filtre TSI, MILHOLLAND, Collins(2010)	- miniaturisé et portable; - nettoyage facultatif; - économie d'une source d'air «propre»; - facilité d'utilisation; - peu coûteux, possibilité de récupération; des filtres en fin du cycle de vie.	- remplacement permanent des filtres ; - limité aux particules de calibrage du média filtrant; - efficacité dépendant du type de filtre; - n'est pas encore accepté par la méthode 5 de la norme EPA.
Diluteur à volume constant CAMBUSION	- rapport qualité-prix; - fiable et excellent ; - excellente dilution; - méthode 5 de l'EPA;	- dimensionnement; - contrôle permanent; - nettoyage obligatoire; - utilisation des vannes de contrôle de débit de haute qualité,

1.3 Conclusion partielle

Ce premier chapitre a permis de ressortir de la littérature les informations pertinentes sur l'étude notamment le polissage du granite, les types d'échantillonnage, et la dilution des poussières et des aérosols. Le diluteur à volume constant a été retenu pour les essais de dilution présenté au deuxième chapitre. Les aérosols de NaCl sont utilisés en substitution des poussières de silice générés par le polissage des granites. La dilution des aérosols NaCl est comparée à la dilution du gaz traceur CO₂ pour observer si le processus et le facteur de dilution sont comparables dans les mêmes conditions expérimentales.

CHAPITRE 2

DILUTION DES AÉROSOLS NaCl ET DU GAZ TRACEUR CO₂

Ce chapitre étudie le processus de dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO₂. Une étude comparative du facteur de dilution permet d'identifier les tailles d'aérosols qui auraient un comportement similaire aux gaz. Les aérosols de NaCl sont choisis en raison de leurs propriétés physiques similaires à ceux de la silice cristalline et de leur faible toxicité. Ce chapitre permet : la description du dispositif expérimental utilisé pour les aérosols NaCl et le gaz traceur CO₂, la modélisation du processus de dilution dans la chambre utilisée, la présentation des résultats des facteurs de dilution obtenus dans les conditions imposées et de la comparaison du processus de dilution des aérosols NaCl avec la technique de référence du gaz traceur CO₂ et finalement de fournir les recommandations pour une dilution au cours de l'échantillonnage sur le banc d'essai de polissage.

2.1 Dispositif expérimental de dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO₂

Le processus d'échantillonnage avec dilution à volume constant est celui qui est l'objet de notre étude. Elle consiste à diluer une concentration donnée d'aérosols et à mesurer la concentration finale du mélange par les appareils de mesures de la qualité de l'air. Une estimation du maximum de dilution permet de cerner les limites d'utilisation de chaque chaîne de mesure des concentrations en fonction des conditions de dilution, d'étudier l'influence de la concentration de solution aqueuse de NaCl et de la pression de génération des aérosols NaCl sur le facteur de dilution. Il s'agit d'une part de déterminer le facteur de dilution à appliquer au système d'échantillonnage lorsque les aérosols sont émis dans les conditions opérationnelles présentant de fortes concentrations, et d'identifier les paramètres de dilution susceptibles d'influencer les principales réponses (concentrations en masse, en nombre et en surface spécifique) d'autre part.

2.1.1 Dispositif expérimental de la dilution des aérosols NaCl

Le dispositif expérimental (Figure 2.1) est un système comportant : un générateur artificiel d'aérosol, un tube à gel de silice, une source de pression d'air propre, une grande chambre de prédilution, une petite chambre de mélange ou diluteur cylindrique et le Scanning Mobility Particle Sizer «SMPS #3080».

2.1.1.1 Le générateur d'aérosols

Le générateur d'aérosol est un nébuliseur comportant une bouteille sous pression, un cylindre à jets et une solution aqueuse de chlorure de sodium. Au cours des essais, les aérosols NaCl émises sont polydispersés avec des diamètres qui varient en fonction de la concentration de la solution mère (leur diamètre médian se situe autour de 50 nm). Les aérosols circulent ensuite vers un tube à gel de silice afin d'être séchés.

2.1.1.2 Le tube à gel de silice

Le tube à gel de silice (Figure 2.2) est une boîte cylindrique où est introduit de l'hydroxyde de silicium $\text{Si}(\text{OH})_4$ en pastille de forme sphérique et de couleur bleue. Le gel de silice est un polymère d'acide silicique préparé à partir de silicate de sodium. En surface, des groupes silanol ($\text{Si}-\text{OH}$) subsistent et sont responsables de la très forte polarité du gel de silice. En présence d'eau, cette surface s'hydrate ce qui provoque une diminution de la polarité. Les grains de gel de silice sont poreux et permettent l'absorption de l'humidité. Leurs tailles et leurs pores dépendent très fortement de la méthode de préparation utilisée. La structure granulométrique du gel de silice permet une très grande surface spécifique (de l'ordre de 500 à 600 m^2/g) qui lui donnent les propriétés desséchantes. Ainsi l'air comprimé chargé d'aérosols humides de NaCl, traverse les granulés de gel de silice et celui-ci adsorbe la vapeur d'eau en se changeant de couleur du bleu au rose. L'aérosol sec et solide sort du tube pour un éventuel échantillonnage par un appareil de mesure de la qualité de l'air.

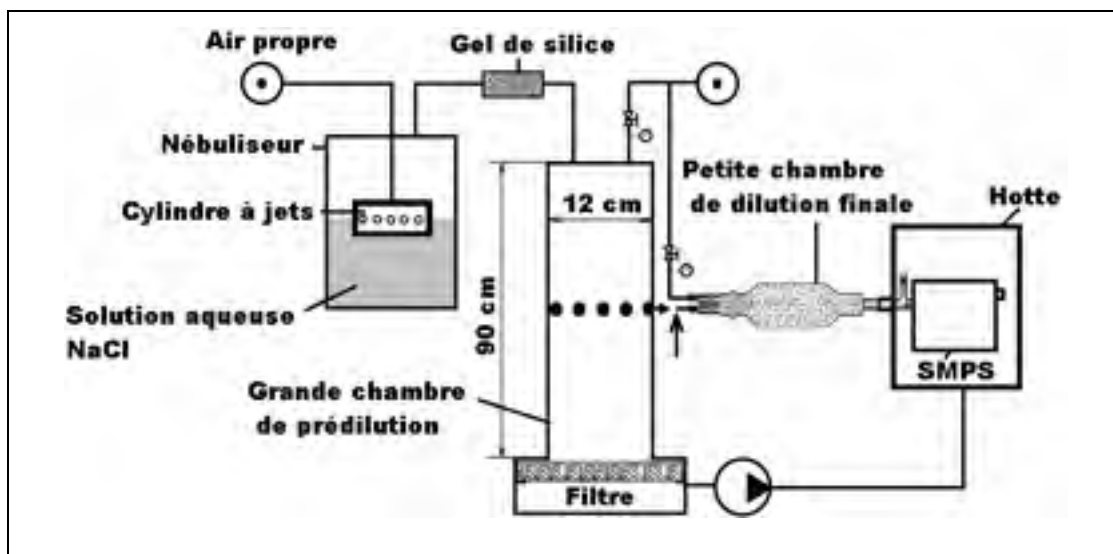


Figure 2.1 Dispositif expérimental des essais de dilution de NaCl

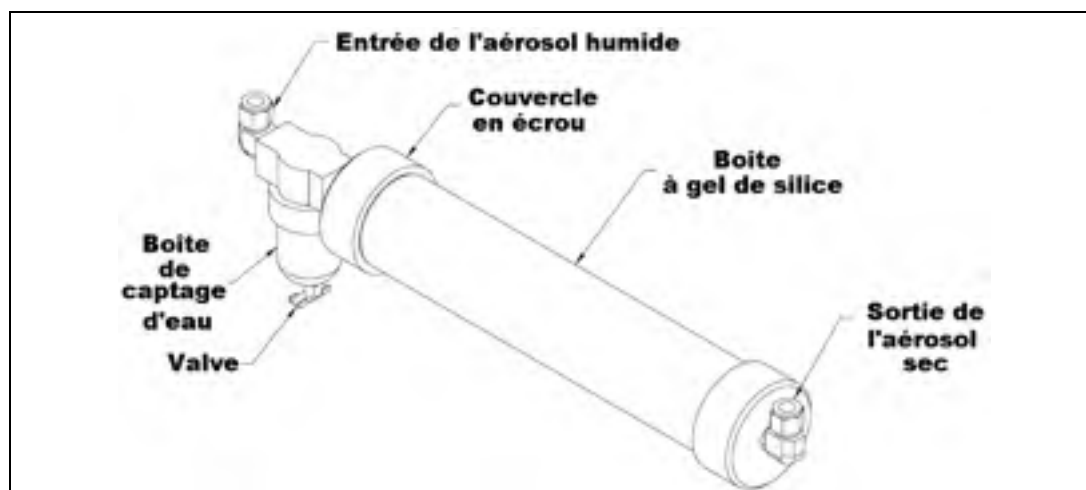


Figure 2.2 Croquis du tube à gel de silice

2.1.1.3 Le diluteur

La grande chambre verticale de prédilution est un cylindre vertical de diamètre extérieur 12 cm et de hauteur 90 cm. Elle comporte deux orifices d'injections respectives de l'air propre et de l'aérosol sec de NaCl. Le mélange est préalablement dilué et ensuite injecté dans la petite chambre à travers l'une des sorties prévu au milieu du cylindre vertical. Cette chambre de prédilution est facultative car l'aérosol peut être injecté directement dans la petite chambre selon l'objectif visé. La petite chambre est un volume de forme cylindrique comprenant deux orifices d'injection A et B (air propre et air chargé d'aérosols secs) de diamètre 4 mm, un corps volumique assimilé à un cylindre de diamètre 60 mm et de longueur 400 mm, et un orifice de sortie du mélange C de diamètre 4 mm (Figure 2.3).

2.1.1.4 Le débitmètre massique TSI série 4100 et les rotamètres

Pour le mesurage des débits, un débitmètre massique TSI série 4100- CAJ27395 et quatre rotamètres (marque «Duter», «Gilmont» et «Gallian») ont été utilisés. La plage de lecture du débitmètre TSI série 4100- CAJ27395 (Figure 2.4), varie entre 0,01 et 20 LPM et un temps de réponse d'environ 4 ms, et leur précision de lecture est de $\pm 2\%$. Il fonctionne par le contrôle des effets de refroidissement du gaz lorsque celui-ci passe sur l'élément chauffant. Le gaz circule dans un tube de mesure contenant deux sondes en platine (Pt100) dont l'une est utilisée pour la mesure de température du gaz tandis que l'autre sert d'élément chauffant. Les performances du débitmètre massique sont meilleures lorsque la température ambiante ou la température du gaz sont relativement stables. Pour ce qui est des rotamètres (Figure 2.5), leurs caractéristiques sont fournies au tableau 2.1. Ils fonctionnent selon le principe de la bille en suspension dans un tube avec la partie intérieure conique et qui est levé par l'inertie créée par le passage de l'air. La hauteur graduée d'équilibre de la bille dépend du débit appliquée. L'étalonnage des rotamètres s'est fait dans des conditions de température et de pression de référence où les droites d'étalonnage des rotamètres ont été obtenues avec une corrélation de 99.86% pour les débits élevés (bille de métal) et de 99.52% pour des débits faibles mesurées en LPM (Figure 2.6).

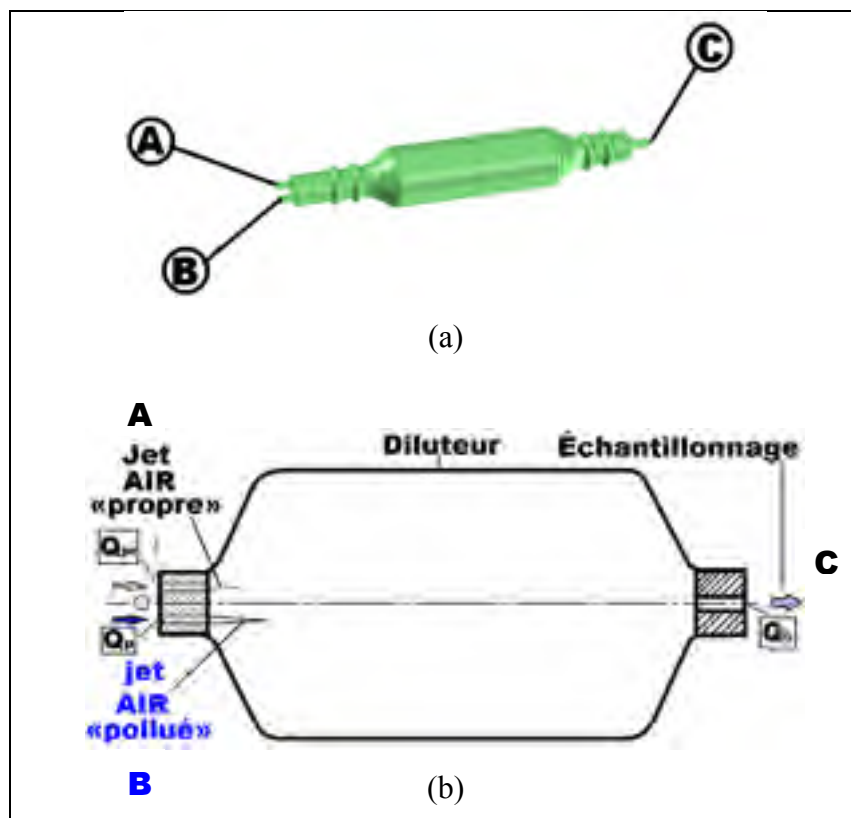


Figure 2.3 Diluteur à volume constant : (a) modèle CATIA, (b) coupe transversale



Figure 2.4 Débitmètres TSI4100S

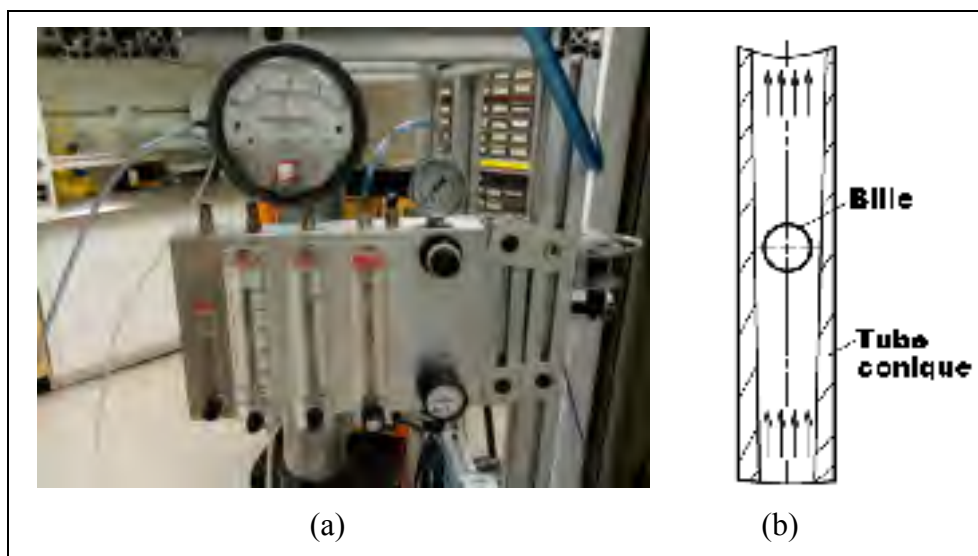


Figure 2.5 Rotamètres: (a) Photo modèle Gillian, Duter, et Gallian; (b) Coupe longitudinale

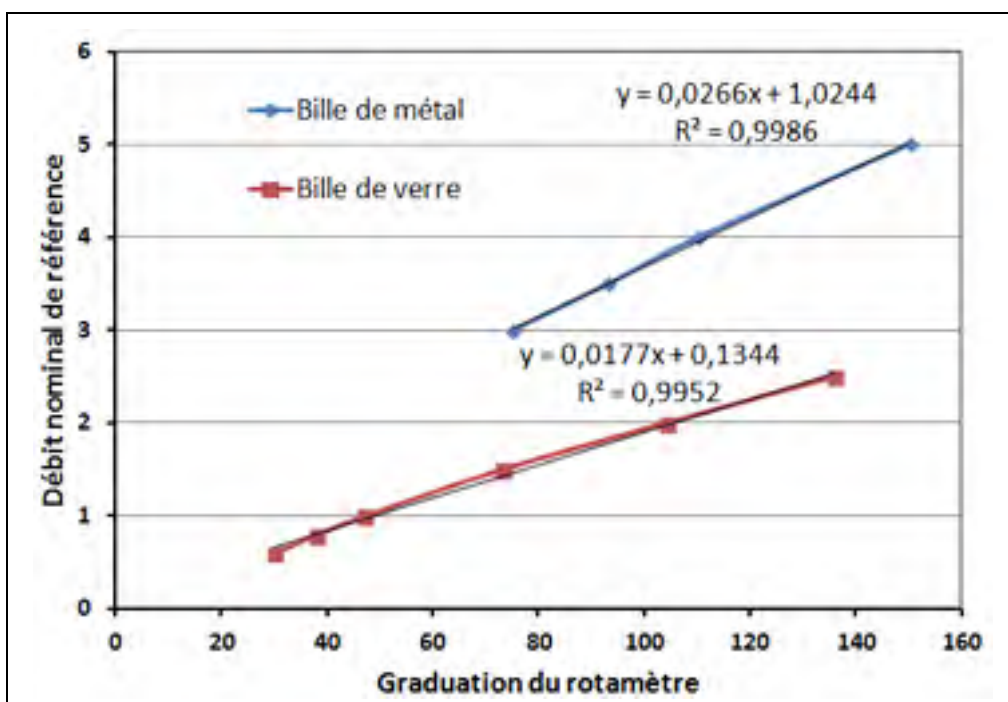


Figure 2.6 Graphiques d'étalonnage du rotamètre à bille

Tableau 2.1 Caractéristiques des rotamètres
Tiré de Lazure et al (2004)

Marque	Débit (LPM)	Pression (PSI)	Température (°C)	Incertitude (%)
Duter	0 - 1	10	21,1	±0.5
Gilmont	0 - 5	10	21,1	±0.5
Duter	0 - 20	10	21,1	±1
Gillian	0 - 30	10	21,1	±1

2.1.1.5 Le Scanning Mobility Particle Sizer «SMPS #3080»

Le mesurage des concentrations numériques des particules selon leur diamètre de mobilité électrique se fera par le «Scanning Mobility Particle Sizer» (Figure 2.7) qui est composé d'un classificateur électrostatique, d'un analyseur différentiel de mobilité et d'un compteur de particules. Le classificateur électrostatique est un appareil de conditionnement qui permet de charger la particule en lui transmettant une charge électrique proportionnelle à son diamètre, puis à transporter cette particule à l'aide d'un fluide approprié vers l'analyseur différentiel de mobilité. Le pré-conditionnement se fait par un impacteur qui élimine les grosses particules de taille micrométrique. Le chargeur bipolaire (Kr-85) ou neutraliseur réalise une uniformité de charge dans chaque particule en fonction de leur diamètre réel. Les particules chargées sont transportées vers la partie supérieure du DMA par un écoulement laminaire. On distinguera le long DMA pour les mesures des concentrations pour les particules de diamètres de mobilité compris entre 10 nm à 1000 nm et le court DMA destiné aux mesures des concentrations pour les particules de diamètre de mobilité compris entre 2 nm à 150 nm.

Pour le long DMA 3081 (TSI, 2014b), les particules en fonction de leur charge et de leur mobilité électrique sont classées selon un diamètre de mobilité variant de 10 à 1000 nm. La mobilité électrique dans un long DMA se définit par :

$$Z = \frac{\left[Q_t - \frac{1}{2}(Q_{ap} + Q_{am}) \right] \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \pi V L} \quad (2.1)$$

Où Q_t est le débit d'écoulement total de l'air venant de la gaine et de l'aérosol polydispersé; Q_i est le débit d'écoulement de l'aérosol monodispersé; r_1 ; r_2 sont respectivement les rayons intérieur et extérieur de l'électrode ; V est la tension au centre de l'électrode ; L est la longueur entre la sortie de l'échantillon et l'entrée de l'aérosol.

Pour le court DMA #3085 contient, un cylindre mis à la terre et une électrode extérieure cylindrique interne qui est connecté à une alimentation négative (0 à 10 kV courant continu). Le champ électrique entre les deux cylindres concentriques sépare les particules en fonction de leur mobilité électrique, qui est inversement proportionnel à la taille des particules. Le diamètre de mobilité électrique d_{me} est le diamètre de la sphère ayant la même mobilité électrique (Z) que la particule (même vitesse de dérive dans un champ électrique). La mobilité électrique dans un court DMA se définit par la formule suivante :

$$Z = n e \frac{C(d_{me})}{3 \pi \eta d_{me}} \quad (2.2)$$

$$\text{avec : } C(d_{me}) = 1 + \frac{\lambda}{d_{me}} \left[2,514 + 0,8 e^{\frac{0,55 d_{me}}{\lambda}} \right] \quad \text{et } \lambda \approx \lambda_0 \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P}$$

où $C(d_{ae})$: Coefficient de correction de Rader; λ, λ_0 : coefficients adiabatiques, n : Nombre de charges élémentaires portées par la particule ; e : Amplitude de l'unité élémentaire de la charge ; η : Viscosité dynamique du gaz absolue ; T_0 et P_0 : respectivement la température et la pression dans les conditions normales; T et P : respectivement la température et la pression dans les conditions effectives d'écoulement.

Le diamètre aérodynamique est le diamètre de la sphère ayant une masse volumique égale à celle de l'eau et la même vitesse de sédimentation (V_s) que la particule. La vitesse de sédimentation d'une particule dépend du diamètre aérodynamique d_{ae} et est définie par :

$$V_s = \rho_0 d_{ae}^2 \frac{C(d_{ae})}{18 \eta} \quad (2.3)$$

$$\text{avec : } C(d_{ae}) = 1 + \frac{\lambda}{d_{ae}} \left[2,514 + 0,8 e^{\frac{0,55 d_{ae}}{\lambda}} \right] \quad \text{et } \lambda \approx \lambda_0 \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P}$$

Le diamètre aérodynamique est lié au diamètre de mobilité électrique par la relation:

$$d_{ae}^2 C(d_{ae}) = \frac{\rho_{eff}}{\rho_0} d_{me}^2 C(d_{me}) \quad (2.4)$$

avec : ρ_{eff} est la masse volumique effective de la particule, $\rho_0 = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$: Masse volumique de l'eau.

Le compteur de particules par condensation (CPC) Model # 3786 (Figure 2.8) utilise une technique de condensation pour agrandir de petites particules à une taille nécessaire au détecteur optique. Les particules sont passées à travers une mèche et cultivées avec de l'eau ou le butanol. Une fois le flux de l'aérosol saturé et la température équilibrée, ils peuvent passer individuellement dans faisceau lumineux en réfléchissant ainsi la lumière captée par un photodétecteur qui décompte les aérosols en nombre.

2.1.2 Dispositif expérimental de dilution du gaz traceur CO₂

Dans la même configuration d'expérimentation que celle des aérosols, le gaz carbonique CO₂ sera dilué dans un volume constant (Figure 2.9). L'objectif de ces essais est de comparer les facteurs de dilution obtenus dans les deux cas de dilution.

2.1.2.1 La bonbonne de stockage du gaz traceur CO₂ sous pression

C'est une bouteille cylindrique en acier inoxydable de dimensions approximatives : le diamètre 50 cm et la hauteur est de 150 cm. Elle contient du gaz carbonique (CO₂) sous pression. Un détendeur et deux manomètres permettent de lire la pression intérieure de la bouteille et la pression de sortie.

2.1.2.2 L'analyseur de gaz LFG20

L'analyseur de gaz dont les caractéristiques sont données au tableau 2.2 utilise le principe de fonctionnement de l'absorptiométrie infrarouge (IR) pour mesurer le pourcentage de dioxyde de carbone dans une portion de gaz collecté (Figure 2.10).

L'analyse d'un gaz par absorption IR repose sur la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 e^{-cC} \quad (2.5)$$

où, I : Intensité lumineuse infrarouge du détecteur de présence du CO_2 , I_0 : Intensité lumineuse IR du détecteur de présence du gaz zéro, c : Constante dépendant de la longueur de la chambre de mesure et de la longueur d'onde du rayonnement, C : concentration du CO_2 .

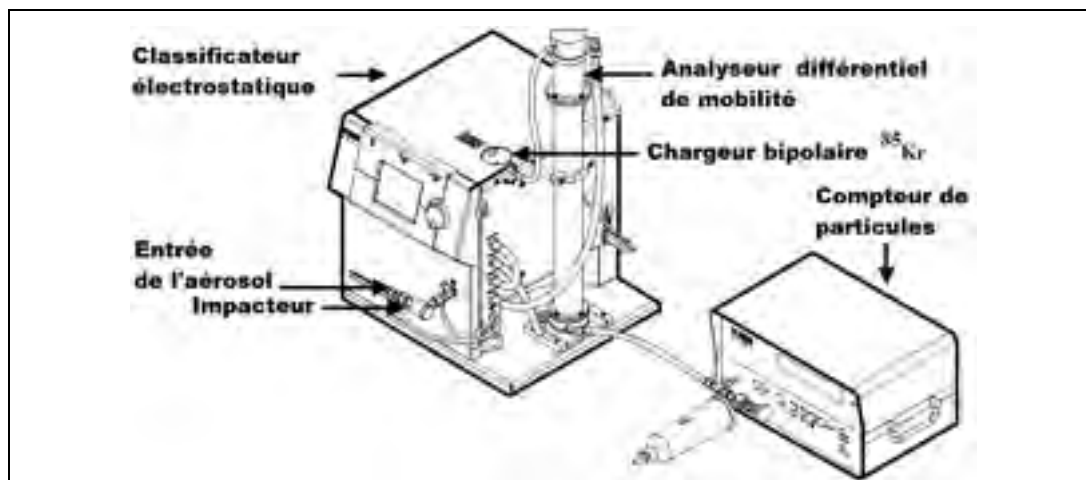


Figure 2.7 Croquis du SMPS
Adaptée de www.tsi.com
consultée le 28/02/2014

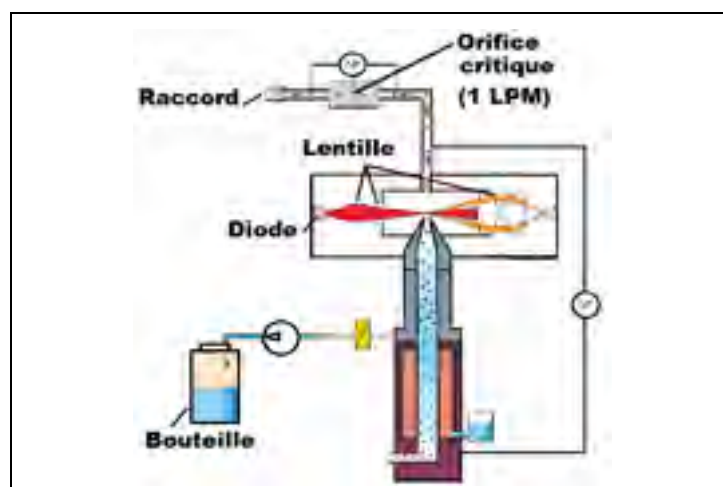


Figure 2.8 Croquis du compteur de particules
Adaptée de www.tsi.com
consultée le 28/02/2014



Figure 2.9 Photo du banc d'essai de dilution du CO_2

Tableau 2.2 Caractéristiques de l'analyseur LFG 20

Désignation	Caractéristiques
Technique de mesure	Absorption infrarouge non dispersive
Plage de lecture /Incertitude	de 0-10% / $\pm 0,5\%$ et de 10-100% / $\pm 3\%$
Temps de réponse	<15 s

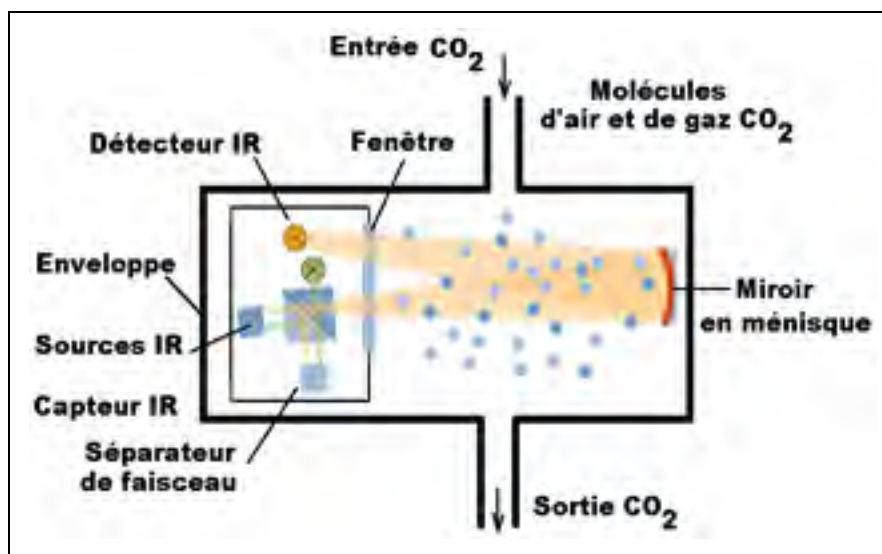


Figure 2.10 Schéma de principe de l'absorptiométrie IR
Tirée de Catalogue LFG 20

2.2 Méthodes

Dans le cadre de cette recherche, nous utiliserons pour l'estimation du facteur de dilution les méthodes de Giechaskiel, (2009a) et de Collins (2010). Les méthodes de plans d'expériences permettront de varier les facteurs influençant le facteur de dilution afin de ressortir un modèle empirique facilitant la prédiction de celui-ci pour une application liée au polissage réel des granites.

2.2.1 Méthodes de Giechaskiel, (2009a) et de Collins (2010)

Giechaskiel, (2009a) et Collins (2010) ont modélisé la dilution par quatre pôles d'actions: l'«air propre», l'«air pollué», le mélange, les pertes numériques d'aérosols et l'échantillonnage sur un appareil de mesure des concentrations (Figure 2.11). Ainsi ces auteurs ont défini les éléments de caractérisation de la dilution des aérosols suivants: le facteur de dilution débit massique (DF_M); le facteur de dilution débit volumique ($DF_{P,di}$); le facteur de dilution concentration massique (DF_M); le facteur de dilution concentration numérique ($DF_{P,di}$); la pénétration de l'aérosol à travers le diluteur ($P_{P,di}$); la perte numérique de l'aérosol à travers le diluteur ($L_{P,di}$).

2.2.1.1 Le facteur de dilution «débit massique»

Le facteur de dilution massique est le rapport entre le débit massique de sortie du mélange par le débit de l'«air pollué» à l'entrée du diluteur avec l'hypothèse selon laquelle le débit massique de sortie du diluteur est la somme du débit massique de l'«air pollué» et du débit massique de l'«air propre». Le facteur de dilution «débit massique» donne une fonction linéaire du débit massique de l'«air propre» pour un débit massique d'«air pollué» constant :

$$DF_M = \frac{M_s}{M_p} = \frac{M_p + M_{pr}}{M_p} = 1 + \left(\frac{1}{M_p} \right) M_{pr} \quad (2.6)$$

2.2.1.2 Le facteur de dilution «débit volumique»

Le facteur de dilution «débit volumique» (DF_D) est le rapport entre le débit volumique de sortie du diluteur par le débit volumique de l'«air pollué» à l'entrée du diluteur avec l'hypothèse selon laquelle le débit volumique de sortie du diluteur est la somme du débit volumique de l'«air pollué» et du débit volumique de l'«air propre» :

$$DF_V = \frac{Q_s}{Q_p} \quad (2.7)$$

2.2.1.3 Le facteur de dilution théorique

Le facteur de dilution théorique «débit» (DF_{TD}) est calculé avec l'hypothèse de l'incompressibilité des fluides qui se traduit par le débit à la sortie Q_s est la somme du débit de l'«air propre» (Q_{pr}) et débit de l'«air pollué» (Q_p) :

$$Q_s = Q_{pr} + Q_p \quad (2.8)$$

Le facteur de dilution théorique «débit» (DF_{TD}) donne une fonction linéaire du débit volumique de l'«air propre» pour un débit d'«air pollué» constant :

$$DF_{TD} = \frac{Q_s}{Q_p} = \frac{Q_{pr} + Q_p}{Q_p} = \left(\frac{1}{Q_p} \right) Q_{pr} + 1 = A X + B \quad (2.9)$$

Avec $A = \frac{1}{Q_p}$; $X = Q_{pr}$; $B = 1$

2.2.1.4 Le facteur de dilution «concentration massique»

Le facteur de dilution «concentration massique» (DF_{CM}) est le rapport entre la concentration massique de l'air «pollué» à l'entrée du diluteur (C_p en mg/cm^3) et la concentration massique du mélange à la sortie du diluteur (C_s en mg/cm^3). Il est calculé avec l'hypothèse que l'air «propre» ne contient pas d'impuretés. Par conséquent la concentration d'impuretés est négligeable : $C_{imp} \approx 0$:

$$DF_{CM} = \frac{C_p - C_{imp}}{C_s - C_{imp}} = \frac{C_p}{C_s} \quad (2.10)$$

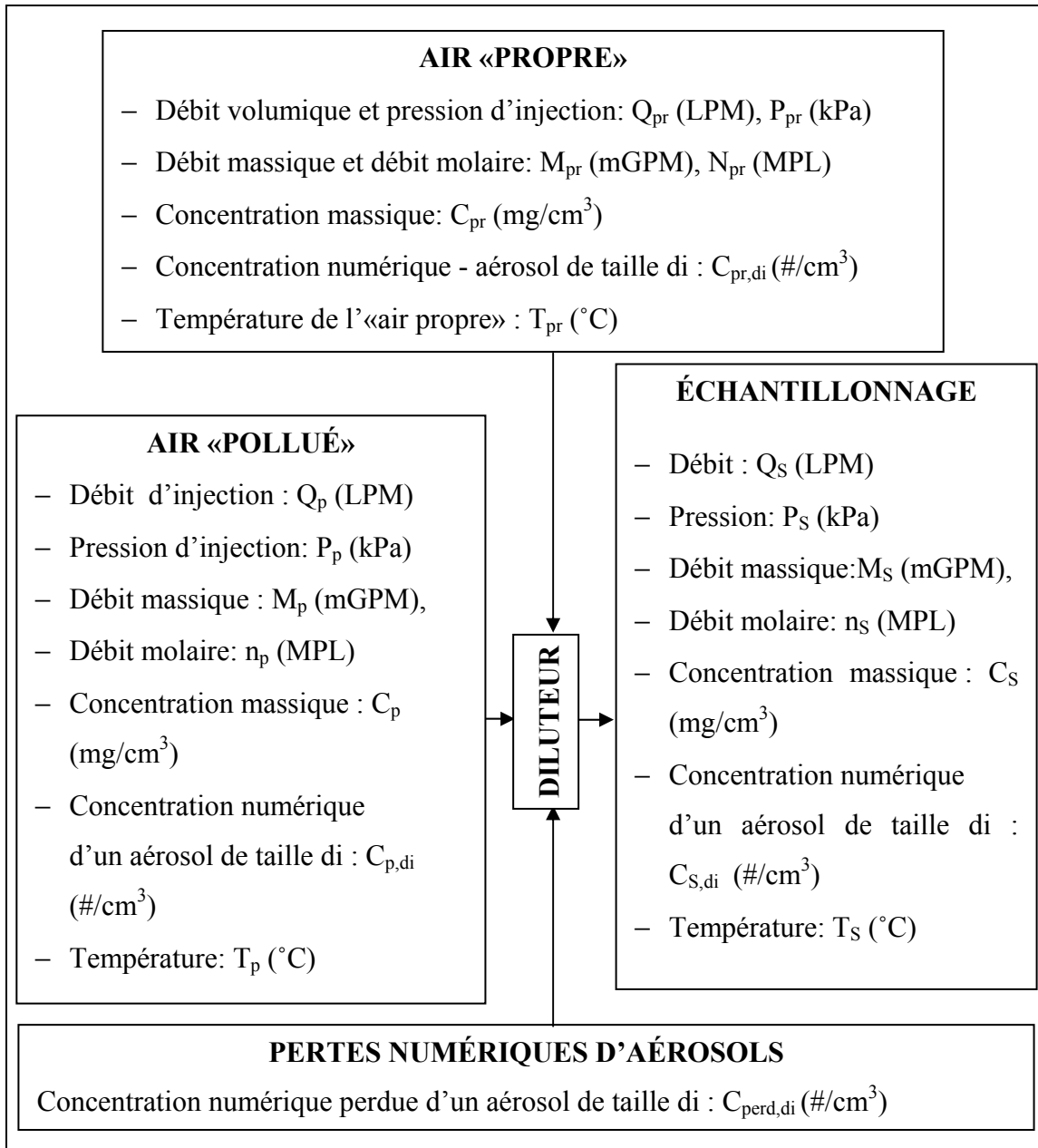


Figure 2.11 Organigramme du processus dilution
Tirée de Giechaskiel, (2009a)

2.2.1.5 Le facteur de dilution «concentration volumique»

Le facteur de dilution «concentration volumique» (DF_{CV}) est le rapport entre la concentration volumique de l'«air pollué» à l'entrée du diluteur (C_p en % ou en ppm) et la concentration volumique du mélange à la sortie du diluteur (C_s en % ou en ppm). Il est calculé avec l'hypothèse selon laquelle l'«air pollué» ne contient pas d'impuretés ($C_{pr} = 0$) :

$$DF_{CV} = \frac{C_p}{C_s} \quad (2.11)$$

2.2.1.6 Le facteur de dilution «concentration numérique» avec des pertes d'aérosols non négligeables

Le facteur de dilution «concentration numérique» (DF_{CN}) pour un diamètre de particule (d_i) est le rapport entre la concentration numérique de l'«air pollué» par la concentration numérique du mélange à la sortie du diluteur. La pénétration de l'aérosol ($P_{p, di}$) est le rapport entre la concentration numérique de l'«air pollué» par la concentration numérique du mélange à la sortie du diluteur.

$$DF_{CN} = \frac{C_{p, di} - C_{pr, di}}{C_{s, di} - C_{pr, di}} = \frac{C_{p, di}}{C_{s, di}} = \frac{C_{p, di} + C_{pr, di}(DF_M - 1)}{C_{s, di}} = \frac{DF_M}{P_{p, di}} \quad (2.12)$$

$$\text{avec } P_{p, di} = \frac{C_{s, di}}{C_{p, di} - C_{pr, di}(DF_M - 1)} DF_M$$

Si $DF_M = 1$ alors le facteur de dilution est inversement proportionnel à la pénétration :

$$DF_{CN} = \frac{C_{p, di} + C_{pr, di}(1 - 1)}{C_{s, di}} = \frac{C_{p, di}}{C_{s, di}} = \frac{1}{P_{p, di}} \quad (2.13)$$

La perte numérique dans le diluteur est donnée à l'équation 2.14. Elle exprime la différence entre l'unité et la pénétration.

$$L_{p, di} = 1 - P_{p, di} = 1 - \frac{C_{s, di}}{C_{p, di} - C_{pr, di}(DF_M - 1)} DF_M \quad (2.14)$$

Si $DF_M = 1$ alors la perte numérique dans le diluteur est donnée à l'équation 2.15. :

$$L_{P,di} = 1 - \frac{C_{S,di}}{C_{p,di} - C_{pr,di}(DF_M - 1)} DF_M = 1 - \frac{C_{S,di}}{C_{p,di}} DF_M \quad (2.15)$$

2.2.1.7 Le facteur de dilution théorique «concentration»

On distinguera deux cas à savoir : le facteur de dilution théorique «concentration» pour un temps de résidence non négligeable et le facteur de dilution théorique «concentration» pour un temps de résidence négligeable.

Pour un temps de résidence négligeable, le facteur de dilution théorique «concentration» (DF_{TC}) est calculé avec deux hypothèses : l'incompressibilité des fluides et de la conservation du nombre des particules entrants (N_p) et sortants (N_s) :

$$V_{pr} + V_p = V_s, \quad N_p = N_s \quad (2.16)$$

or, $C_p = \frac{N_p}{V_p}$; $C_s = \frac{N_s}{V_s}$, le facteur de dilution théorique-concentration (DF_{TD}) est :

$$DF_{TC} = \frac{\frac{N_p}{V_p}}{\frac{N_s}{V_s}} = \frac{N_p}{N_s} \times \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_p}{N_s} \left[\frac{V_{pr} + V_p}{V_p} \right] = \frac{N_p}{N_s} \left[\left(\frac{V_{pr}}{V_p} \right) + 1 \right] = \frac{N_p}{N_s} \left[\left(\frac{1}{Q_p} \right) Q_{pr} + 1 \right] \quad (2.17)$$

$$DF_{TC} = \left(\frac{1}{Q_p} \right) Q_{pr} + 1 = A X + B \quad (2.18)$$

avec $A = \frac{1}{Q_p}$; $X = Q_{pr}$; $B = 1$

Le facteur de dilution théorique-concentration (DF_{TC}) pour un temps de résidence négligeable est égal au facteur de dilution théorique-débit (DF_{TD}). Pour un temps de résidence non nulle, le facteur de dilution théorique «concentration» (DF_{TC}) sera le rapport entre la concentration de l'«air pollué» (C_p) et la concentration du mélange à la sortie du diluteur (C_s) avec l'hypothèse de l'incompressibilité des fluides et de la conservation des volumes.

Or Abdul Khalek (1999) a montré que les pertes d'aérosols sont principalement influencées par le coefficient de coagulation et le temps de résidence dans le volume de mélange du diluteur. Le nombre de particules contenu dans le mélange à la sortie dépend du nombre de particules à l'entrée et du temps de résidence

$$N_s = \frac{N_p}{1 + N_p k_{ij} t_r}$$

$$\Rightarrow \frac{N_p}{N_s} = 1 + N_p k_{ij} t_r \quad (2.19)$$

où k_{ij} : coefficient de coagulation des aérosols dépendant de la taille des particules (cm^3/s),
 t_r : temps de résidence dans la chambre de mélange (s)

Le facteur de dilution donne une fonction linéaire à deux variables séparés (le temps de résidence et le débit d'air propre injecté).

$$DF_T = (1 + N_p k_{ij} t_r) \left[\left(\frac{1}{Q_p} \right) Q_{pr} + 1 \right] = (1 + N_p k_{ij} t_r) (A X + B) \quad (2.20)$$

avec $A = \frac{1}{Q_p}$; $X = Q_{pr}$; $B = 1$; k_{ij} : coefficient de coagulation des aérosols dépendant de la taille des particules (cm^3/s) ; t_r : temps de résidence dans la chambre de mélange (s); N_p : nombre de particules dans l'air «pollué».

2.2.1.8 Le taux de variation de la concentration diluée

Le taux de variation de la concentration des aérosols NaCl ou de la concentration du gaz traceur CO_2 au cours de la dilution est rapport de variation des concentrations massiques ou numériques par la variation de débit d'air propre :

$$T_{VD} = \frac{3}{50} \frac{\Delta C_{NT}}{\Delta Q_{pr}} \quad (2.21)$$

Avec ΔC_{NT} : Variation de la concentration massique, numérique ou volumique Variation de la concentration de CO_2 en pourcentage (entre deux débits d'«air propre» consécutifs (mg/cm^3 , $\#/\text{cm}^3$ ou en %vol.); ΔQ_{pr} : Variation de débit d'«air propre» (LPM); T_{VD} : Taux de variation de la concentration ($\text{mg.s}/\text{cm}^6$, $\#.s/\text{cm}^6$, $\%.s/\text{cm}^3$)

2.2.2 Méthodes des plans d'expériences

Cette section présentera le plan expérimental adopté pour la dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO₂,

2.2.2.1 Le plan expérimental de dilution des aérosols NaCl

Le plan complet sera utilisé avec les facteurs suivants: la concentration de solution aqueuse de NaCl comportant trois niveaux de modalités : 1, 2 et 4 GPL; la pression génération de l'aérosol comportant deux niveaux de modalités (P) : 30 et 40 PSI.

Les réponses mesurées seront notamment: le débit du mélange «air propre» et «aérosol» (Q_s) est mesuré à l'aide d'un débitmètre TSI 4100 « séries » ; la concentration du mélange air «propre» et «aérosol» (C_s en $\#/cm^3$) sera mesurée à l'aide du SMPS. Le débit d'aspiration de cet appareil est de 1.5 LPM et une sortie d'évacuation de l'excès d'aérosol est prévue.

2.2.2.2 le plan expérimental de dilution du gaz traceur CO₂

Pour la dilution du gaz traceur CO₂ nous choisirons la méthode des plans d'expériences avec comme facteurs: le débit d'injection du CO₂ avec trois niveaux de modalités (Q_p): 0.6 ; 0.8 ; et 1 LPM ; le débit de l'air propre avec six niveaux de modalités (Q_{pr}) : 0 ; 1 ; 1.5 ; 2 ; 2.5 ; et 3 LPM. Les réponses mesurées sont : le débit du mélange (Q_s) est mesuré à l'aide d'un débitmètre TSI #4100; la concentration du mélange air «propre» et du gaz carbonique CO₂ sera mesurée à l'aide d'un analyseur de gaz ADC LFG20 munie d'un débit d'aspiration de 0.4 LPM. Une sortie d'évacuation de l'excès gaz non prélevé par l'analyseur permet de ne pas surcharger l'analyseur.

2.2.2.3 L'estimation des concentrations brutes émises avant la dilution

Cette méthode consiste à utiliser le facteur de dilution pour retrouver les concentrations brutes d'avant dilution. Il suffira d'appliquer une homothétie de coefficient égal à ce facteur de dilution sur les concentrations diluées et mesurées par l'appareil de la qualité de l'air.

Ainsi pour estimer le signal brut (C_{i_SD} :) des concentrations, la formule suivante sera appliquée :

$$C_{i_SD} = DF \times C_{i_D} \quad (2.22)$$

C_{i_SD} : Concentration massique «sans dilution»; C_{i_D} : Concentration massique «avec dilution»; DF : Facteur de dilution.

2.3 Comportement de la dilution des aérosols de NaCl

Nous présentons dans cette section les modèles de dilution obtenus, l'influence des différents paramètres de dilution, et le comportement du spectre des concentrations numériques au cours de la dilution.

2.3.1 Les modèles de dilution

Deux modèles ont été obtenus pour les concentrations diluées : le modèle homographique et le modèle exponentiel. Seul le modèle homographique est validé par la modélisation physique.

2.3.1.1 Le modèle homographique de la concentration diluée

Ce modèle s'obtient à partir de l'équation 2.18. Pour Q_p constant, le facteur de dilution théorique est une fonction linéaire du débit d'«air propre» injecté. En admettant que le facteur de dilution (DF_T) est une fonction linéaire du débit d'«air propre» (Q_{pr}), on peut déduire la concentration diluée théorique (C_s) par un modèle homographique :

$$DF_T = \frac{C_p}{C_s} = AX + B$$

$$\Rightarrow C_s = f(X) = \frac{C_p}{AX + B} = f(Q_p) = \frac{C_p Q_p}{X + Q_p} \quad (2.23)$$

Où, C_p et Q_p sont des constantes.

La dérivée première de cette fonction est :

$$f'(Q_p) = -\frac{C_p Q_p}{(X + Q_p)^2} < 0 \quad (2.24)$$

Cela signifie que fonction est décroissante au cours de la variation de l'«air propre». Les valeurs extrémales donne :

– à $Q_{pr}=0$

$$C_s = f(0) = \frac{C_p Q_p}{0 + Q_p} = C_p \quad (2.25)$$

– à $Q_{pr}=Q_{pr-lim}$,

$$C_s = f(Q_{pr-lim}) = \frac{C_p Q_p}{Q_{pr-lim} + Q_p} \quad (2.26)$$

– Quand $Q_{pr-lim} \rightarrow \infty$,

$$C_s = f(Q_{pr-lim}) \rightarrow 0 \quad (2.27)$$

2.3.1.2 Le modèle exponentiel de la concentration diluée

L'équation de dilution est régit par :

$$\frac{dC}{C} = dQ_{pr} a \quad \Rightarrow \quad \int_{C-C_L}^{C_p-C_L} \frac{dC}{C} = \int_0^{Q_{pr}} dQ_{pr} a \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{C_s - C_L}{C_p - C_L} = -aQ_{pr}$$

$$C_s = (C_p - C_L)e^{-aQ_{pr}} + C_L \quad (2.28)$$

où a : Constante; C_s : Concentration diluée ($\#/cm^3$ ou %); C_p : Concentration de l'«air pollué» ($\#/cm^3$ ou %) ; C_L : Concentration limite de dilution ($\#/cm^3$ ou %); Q_{pr} : Débit de l'«air propre» (LPM).

2.3.1.3 Le modèle exponentiel du facteur de dilution

Le modèle exponentiel du facteur de dilution «concentration» est de la forme:

$$DF_T = \frac{C_p}{C_s} = \frac{C_p}{(C_p - C_L)e^{-aQ_{pr}} + C_L} \quad (2.29)$$

Cette fonction est linéaire pour des débits d'«air propre» inférieurs à 3 LPM. Mais au-delà, elle suit l'évolution exponentielle.

2.3.2 L'influence des paramètres de dilution sur la concentration diluée et le facteur de dilution

Les résultats présentés aborderont principalement l'influence du débit de l'«air propre», l'influence du débit de l'«air pollué» et le développement des modèles de prédiction pour les concentrations dilués et le facteur de dilution.

2.3.2.1 L'influence du débit de l'«air propre» injecté

Les essais de dilution des aérosols de chlorure de sodium montrent que la concentration et le facteur de dilution sont influencés par le débit de l'«air propre» injecté. Ainsi, en utilisant une solution aqueuse de concentration constante de 2.1685 GPL et une pression d'injection constante de l'aérosol, nous observons des comportements différents de la concentration dilué et du facteur de dilution.

S'agissant de la concentration diluée, sa courbe d'évolution présente une décroissance prononcée et validée par un taux de variation de dilution négatif (Figure 2.12). Ce taux de variation de la dilution (T_{VD}) en fonction du débit d'air «propre» présente des valeurs très faibles lorsque ce débit reste inférieur à 0.2 LPM. Cela peut s'interpréter par le fait que les aérosols subissent relativement les phénomènes de transport (convection et diffusion). Par contre pour les débits d'air «propre» comprises entre 0.2 et 0.6 LPM, le taux de variation de la dilution (T_{VD}) présente des valeurs élevées par rapport celles obtenues précédemment. Lorsque le débit d'air «propre» est supérieur à 0.6 LPM, le taux de variation de la dilution (T_{VD}) tend vers une valeur constante.

Les essais de dilution à une pression d'émulsion de 30 PSI (206842.7 Pa) ont permis d'obtenir deux modèles de régression de la concentration diluée comportant des coefficients de corrélation au-dessus de 90%. Le modèle homographique (Équation 2.36) présente un coefficient de corrélation de 96.04% à un intervalle de confiance de 95% alors que le modèle exponentiel (Équation 2.36) donne un coefficient de corrélation à 99.64% dans un d'intervalle de confiance de 95%. Pour les concentrations diluées, les essais réalisés montrent que le modèle exponentiel représente statistiquement mieux le processus de dilution que le modèle homographique (Figures 2.12, 2.13).

Le comportement du facteur de dilution expérimental est linéaire dans la plage de débit d'air «propre» injecté, ce qui pourrait envisager une cohérence mathématique avec le modèle homographique pour tous les débits d'air «propre» (Figures 2.14a, b).

$$C_s = f(Q_{pr}) = \frac{1.5 \times 10^6}{Q_{pr} + 0.3} \quad (2.30)$$

$$C_s = (5045000)e^{-2.080 Q_{pr}} + 133439 \quad (2.31)$$

Le modèle de régression du facteur de dilution à une pression d'émulsion constante donne l'expression de l'équation 2.38 avec un coefficient de corrélation de 95.28% et un p_value de 0.0002, largement inférieur à 0.05.

$$DF_{C_{30 PSI}} = (5.329 \pm 0.5305) Q_{pr} + (0.4043 \pm 0.2764) \quad (2.32)$$

Toutefois, pour des valeurs de débits d'air «propre» inférieur à 1 LPM, le modèle exponentiel du facteur de dilution a une représentation graphique qui se confond avec le modèle linéaire (Figure 2.15). Mais, ce modèle de régression exponentiel du facteur de dilution présente à un intervalle de confiance de 95% un coefficient de corrélation de 99.94%, qui est bien meilleur que le modèle linéaire. Pour des valeurs de débits d'air «propre» supérieur à 1 LPM, les deux modèles ont tendance à se distinguer par leur tendance. Pendant que, le modèle exponentiel a tendance à atteindre le maximum du facteur de dilution, le modèle linéaire va continuer de croître infiniment.

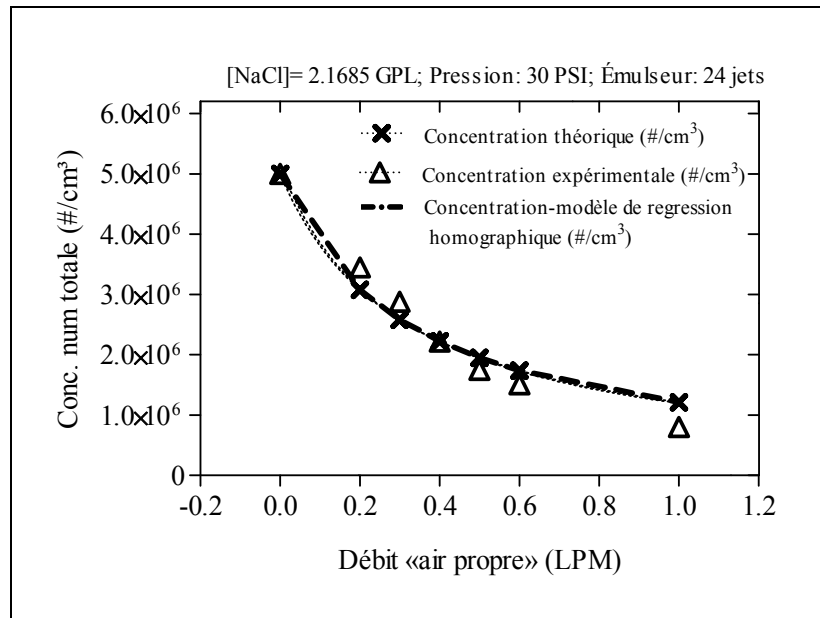


Figure 2.12 Graphiques de la concentration expérimentale et du modèle de régression homographique

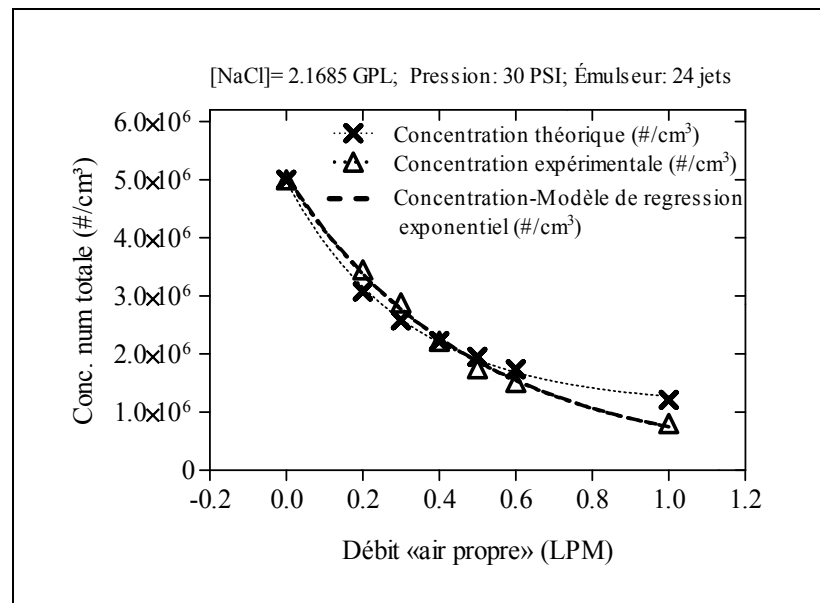


Figure 2.13 Graphiques de la concentration expérimentale et du modèle de régression exponentiel

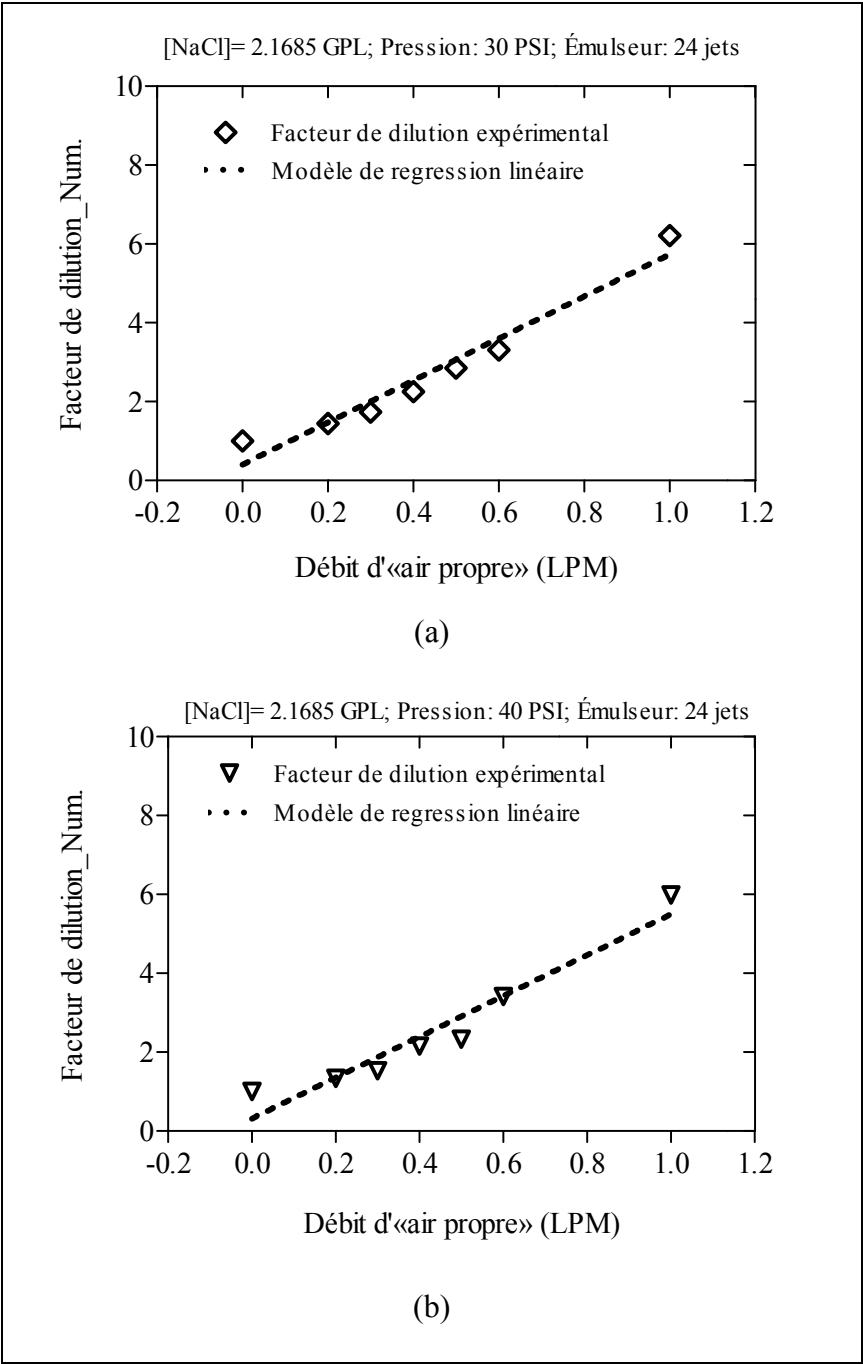


Figure 2.14 Graphique expérimental et modèle de régression linéaire du facteur de dilution à la pression d'émulsion respective : (a) 30 PSI, (b) 40 PSI

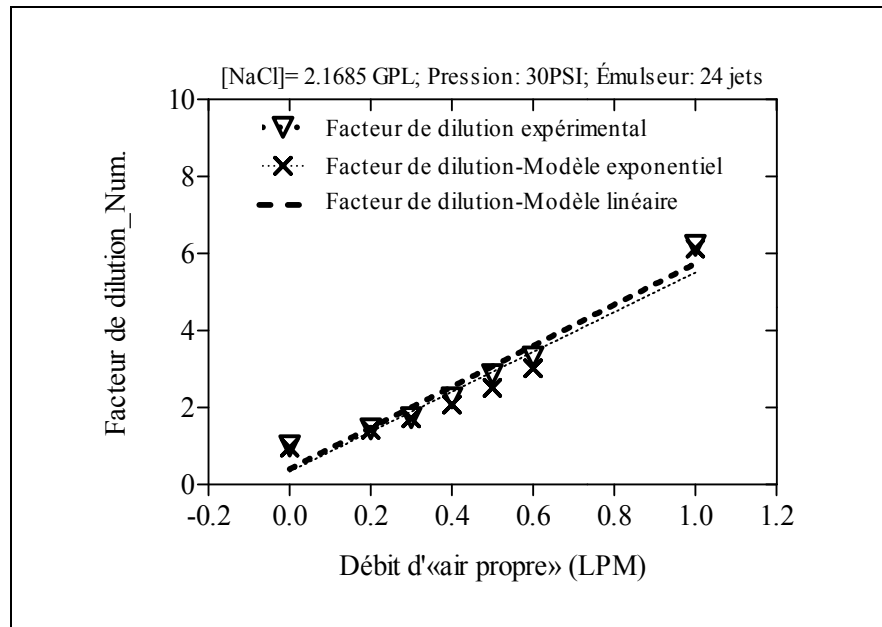


Figure 2.15 Graphiques du facteur de dilution et des modèles de dilution à une pression d'émulsion constante.

À partir de l'observation expérimentale du facteur de dilution, il est fort de noter que le modèle exponentiel se rapproche davantage de la réalité du processus de dilution.

$$DF_{C_{30PSI}} = \frac{5000000}{(5\,045\,000) e^{-2.080 Q_{pr}} + 133439} \quad (2.33)$$

2.3.2.2 L'influence de la pression d'émulsion de la solution NaCl

La pression d'émulsion de la solution de chlorure de sodium n'a pas d'influence significative sur la concentration diluée de l'aérosol et sur le facteur de dilution car en variant cette pression de 30 à 40 PSI, les valeurs expérimentales de la concentration diluée et du facteur de dilution sont pratiquement les mêmes (Figures 2.16 a, b). Un modèle de régression linéaire (Équation 2.34) permet de modéliser le facteur de dilution avec un coefficient de corrélation de 93.14% et un p_value de 0.0004 (< 0.05). Le facteur de dilution maximal atteint la valeur numérique de 6 pour des débits d'air propre inférieur à 1LPM.

Ce facteur dilution maximal reste faible en raison du débit élevé de l'air «pollué». En diminuant ce débit à l'ordre du millilitre par minute, il serait possible d'améliorer ce facteur de dilution maximal.

$$DF_{C_40PSI} = (5.178 \pm 0.6285) Q_{pr} + (0.3166 \pm 0.3274) \quad (2.34)$$

2.3.2.3 L'influence de la concentration de la solution NaCl

Les essais réalisés à l'aide de trois concentrations distinctes de solution de chlorure de sodium ont montré que l'influence de cette concentration de solution sur la concentration des aérosols NaCl et sur le facteur de dilution (Figure 2.17a, b). En effet, les débits d'«air propre» inférieur à 0.2 LPM, les concentrations d'aérosols NaCl sont faibles lorsque la concentration de la solution aqueuse de NaCl est inférieure à 1 GPL. Cette concentration d'aérosols atteint un maximum lorsque la concentration de la solution aqueuse de NaCl a une valeur de 2 GPL. Puis, cette concentration redevient faible pour une concentration de la solution aqueuse de NaCl supérieur à 4GPL.

Pour les débits d'air «propre» compris entre 0.2 et 0.6 LPM, les concentrations d'aérosols NaCl sont sensiblement les mêmes pour les solutions aqueuses de concentrations respectives 2 et 4 GPL. La solution aqueuse de concentration 1 GPL se distingue en générant moins d'aérosols. Au cours de nos essais, il est ressort que la solution aqueuse générant la concentration maximale des aérosols ($5 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$) est celle dont la concentration est de 2.1685 GPL.

L'interprétation donnée à ce phénomène réside dans le comportement de la solution au cours de l'émulsion à une pression constante donnée. Par contre les facteurs de dilution des aérosols générés par les trois solutions aqueuses se distinguent nettement, lorsque le débit d'«air propre» est supérieur à 0.6 LPM. Ainsi, la solution aqueuse à 4 GPL comptabilise plus d'aérosols que la solution aqueuse à 2 GPL. Comparativement aux deux solutions aqueuses citées précédemment, la solution aqueuse à 1 GPL génère le moins d'aérosols.

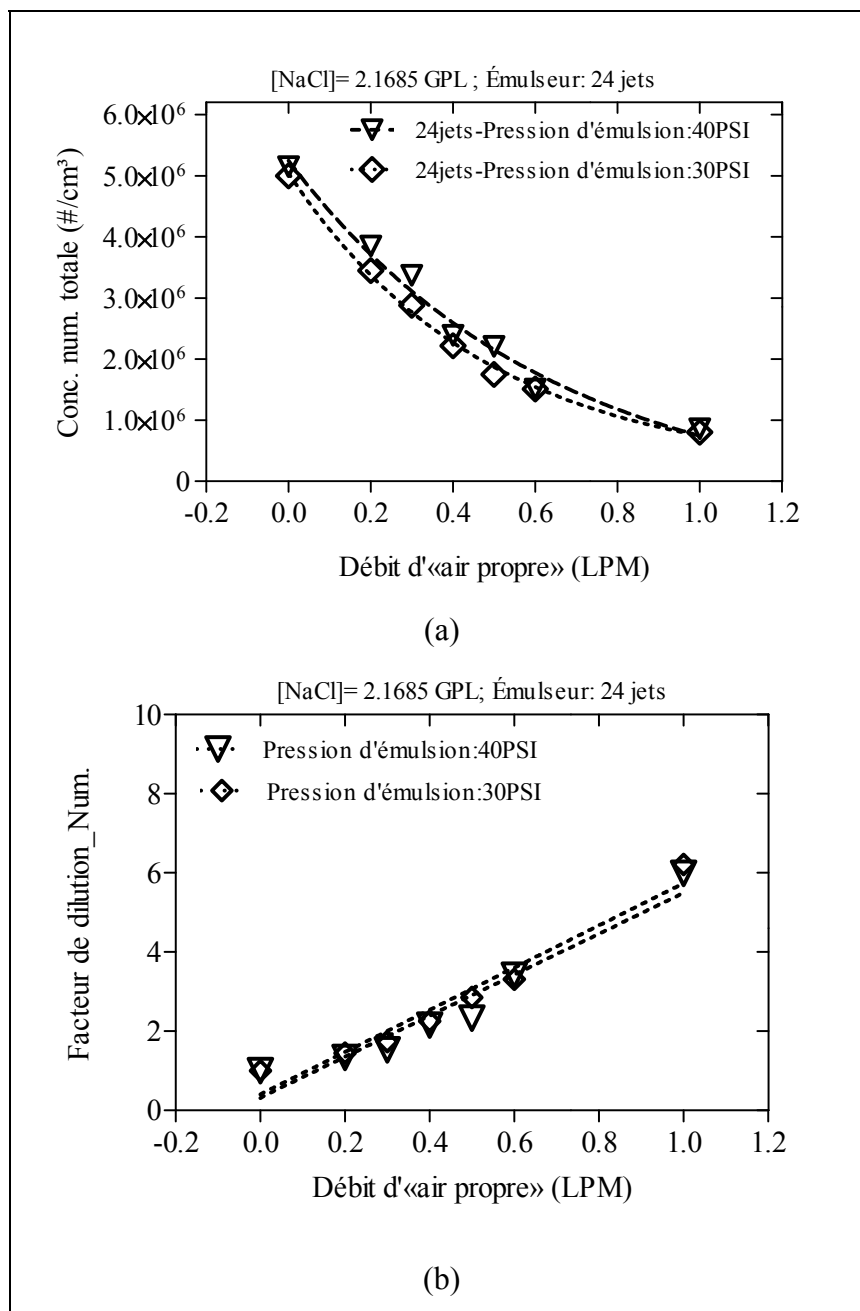


Figure 2.16 Graphiques à 30 et 40 PSI : (a) concentration des aérosols NaCl, (b) facteur de dilution des aérosols NaCl

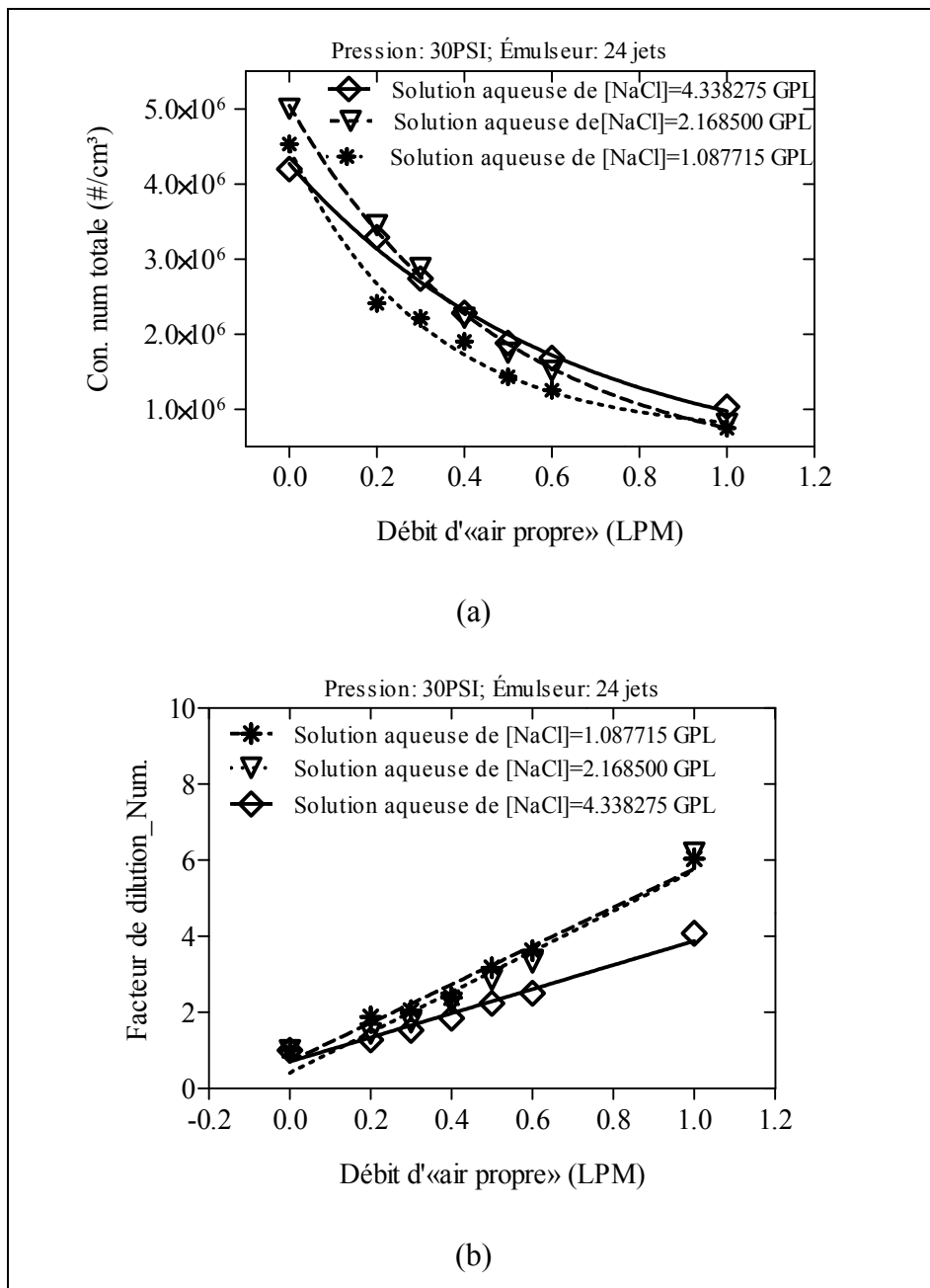


Figure 2.17 Graphiques à différentes concentrations de solutions aqueuses de NaCl : (a) concentration des aérosols NaCl, (b) facteur de dilution

2.3.3 Comportement du spectre des concentrations au cours de la dilution

Les résultats présenteront l'aspect du spectre initial obtenu, l'aspect du spectre après dilution, l'estimation du facteur de dilution moyen et le recouvrement du spectre initial.

2.3.3.1 Comportement du spectre brut des concentrations numériques

Le spectre des aérosols obtenu à l'état initial sans dilution est donné à la figure 2.18. Pour les diamètres de mobilité compris entre 10 et 225 nm (Tableau 2.3), la distribution est lognormale et présente un maximum de concentration ($8.09 \times 10^6 \text{ \#}/\text{cm}^3$) à 63.8 nm (Figure 2.18). Les paramètres de statistiques descriptives sont décrits au tableau 2.4 où la concentration moyenne de la distribution est de $5 \times 10^6 \text{ \#}/\text{cm}^3$. Cette concentration totale sera le paramètre principal de calcul du facteur de dilution-concentration. D'autres auteurs utilisent selon leur objectif les concentrations numériques correspondant à d'autres paramètres statistiques tels que : la médiane, la moyenne arithmétique, la moyenne géométrique, le mode, ou la concentration maximale. La dilution des aérosols est très complexe en raison des phénomènes stochastiques se produisant au cours de leur mélange à de l'«air propre» ou tout autre gaz. L'enjeu d'une bonne dilution est d'obtenir un spectre final qui permet de retrouver le spectre initial avant dilution.

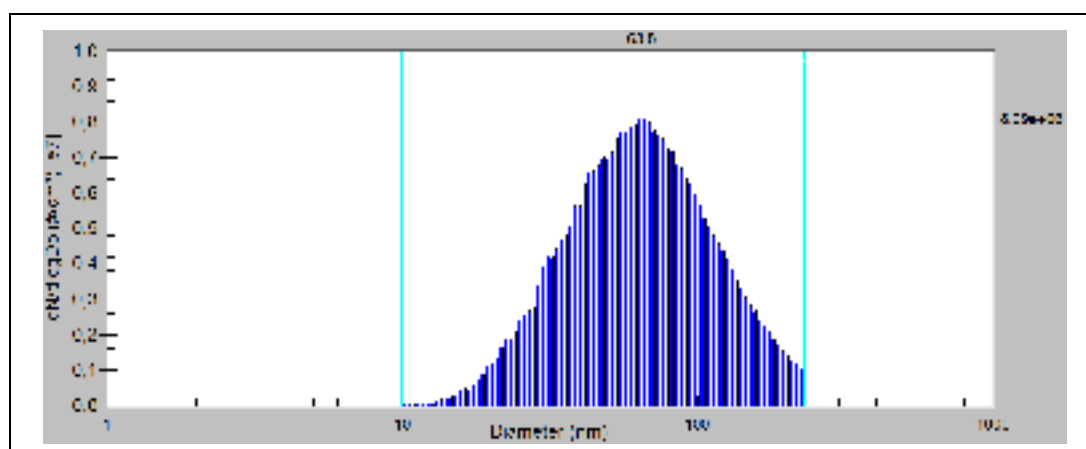


Figure 2.18 Spectre des concentrations d'aérosols NaCl en fonction du diamètre de mobilité compris entre 10 et 225 nm

Tableau 2.3 Diamètres de mobilité mesurés au cours de l'échantillonnage par dilution

i	d _i (nm)		i	d _i (nm)		i	d _i (nm)		i	d _i (nm)
1	10.2		23	22.5		45	49.6		67	109.4
2	10.6		24	23.3		46	51.4		68	113.4
3	10.9		25	24.1		47	53.3		69	117.6
4	11.3		26	25		48	55.2		70	121.9
5	11.8		27	25.9		49	57.3		71	126.3
6	12.2		28	26.9		50	59.4		72	131
7	12.6		29	27.9		51	61.5		73	135.8
8	13.1		30	28.9		52	63.8		74	140.7
9	13.6		31	30		53	66.1		75	145.9
10	14.1		32	31.1		54	68.5		76	151.2
11	14.6		33	32.2		55	71		77	156.8
12	15.1		34	33.4		56	73.7		78	162.5
13	15.7		35	34.6		57	76.4		79	168.5
14	16.3		36	35.9		58	79.1		80	174.7
15	16.8		37	37.2		59	82		81	181.1
16	17.5		38	38.5		60	85.1		82	187.7
17	18.1		39	40		61	88.2		83	194.6
18	18.8		40	41.4		62	91.4		84	201.7
19	19.5		41	42.9		63	94.7		85	209.1
20	20.2		42	44.5		64	98.2		86	216.7
21	20.9		43	46.1		65	101.8		87	224.7
22	21.7		44	47.8		66	105.5			

Tableau 2.4 Caractéristiques de la distribution des concentrations numériques à l'état initial

Paramètres de statistique descriptive	Valeurs
Médiane (nm)	63.4
Moyenne arithmétique (nm)	73.6
Moyenne géométrique (nm)	63.2
Mode (nm)	63.8
Écart-type géométrique (nm)	1.75
Concentration totale (#/cm ³)	5×10 ⁶

2.3.3.2 Comportement du spectre final des aérosols après dilution

Pour l'ensemble des débits testés (0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6 et 1 LPM), la concentration maximale du spectre se trouve pratiquement au diamètre de mobilité de 63.8 nm et sa valeur diminue selon ce même diamètre de mobilité (Figures 2.19, 2.20). Cette situation est interprétée par le fait que le spectre des concentrations est conservé dans son allure indépendamment du débit d'air «propre» injecté.

Cependant, en observant la courbe du facteur de dilution selon le diamètre de mobilité, l'instabilité du facteur de dilution se traduit par une forte variation de ce paramètre pour les tailles est comprise entre 0 et 20 nm. L'interprétation physique donnée à cette situation peut être traduit par la perte due aux phénomènes physiques de transport (agglomération, attraction électrique, collision, sédimentation, ...), ou bien le problème posé par la limite de détection du SMPS par rapport à certaines particules très petites.

Pour les aérosols de NaCl dont le diamètre de mobilité est compris entre 20 et 225 nm, le facteur de dilution est de 1.52 pour un débit d'air propre constant de 0.2 LPM, avec un coefficient de corrélation de 87.91% pour le modèle linéaire constant (Figure 2.21). Ce facteur de dilution correspond à la moyenne statistique des facteurs de dilution des particules dont le diamètre de mobilité est compris entre 20 et 225 nm selon l'équation 2.35 :

$$DF = \frac{\sum_{i=1}^{i=87} DF_i}{87} \quad (2.35)$$

Le facteur de dilution moyen ou celui obtenu à partir d'une régression linéaire constantes sur les tailles de 20 à 225 nm, permet de reconstituer le spectre des concentrations numériques avant dilution selon la figure 2.22. Le spectre initial des concentrations sans dilution et le spectre final des concentrations diluées pour une même solution aqueuse de Chlorure de Sodium présentent la même allure de variation en fonction du diamètre de mobilité. Une homothétie de rapport constant relie deux courbes (Figure 2.22).

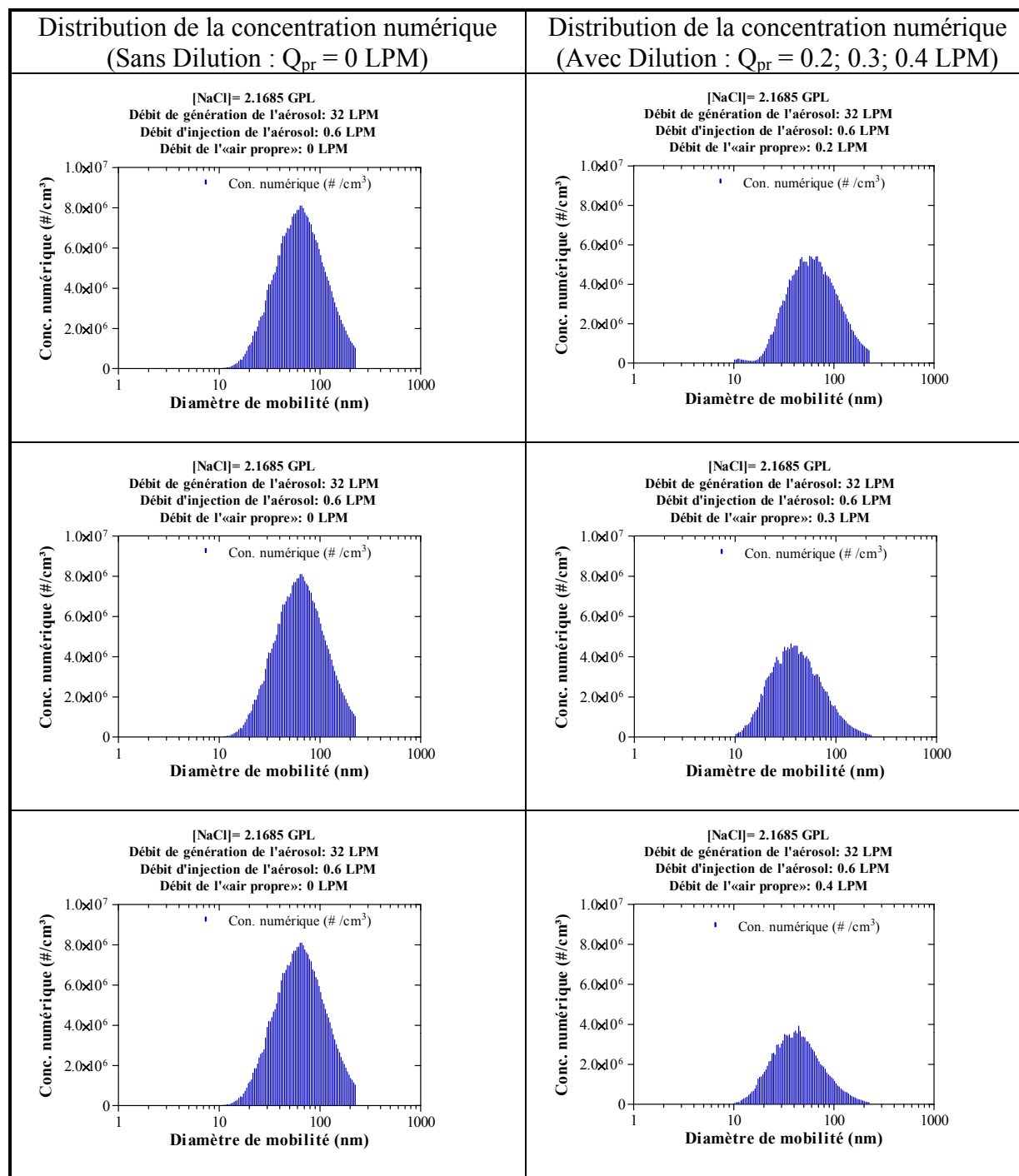


Figure 2.19 Distribution des concentrations d'aérosols NaCl avant dilution et après dilution pour un débit d'«air propre» respectif de 0.2 ; 0.3 ; et 0.4 LPM

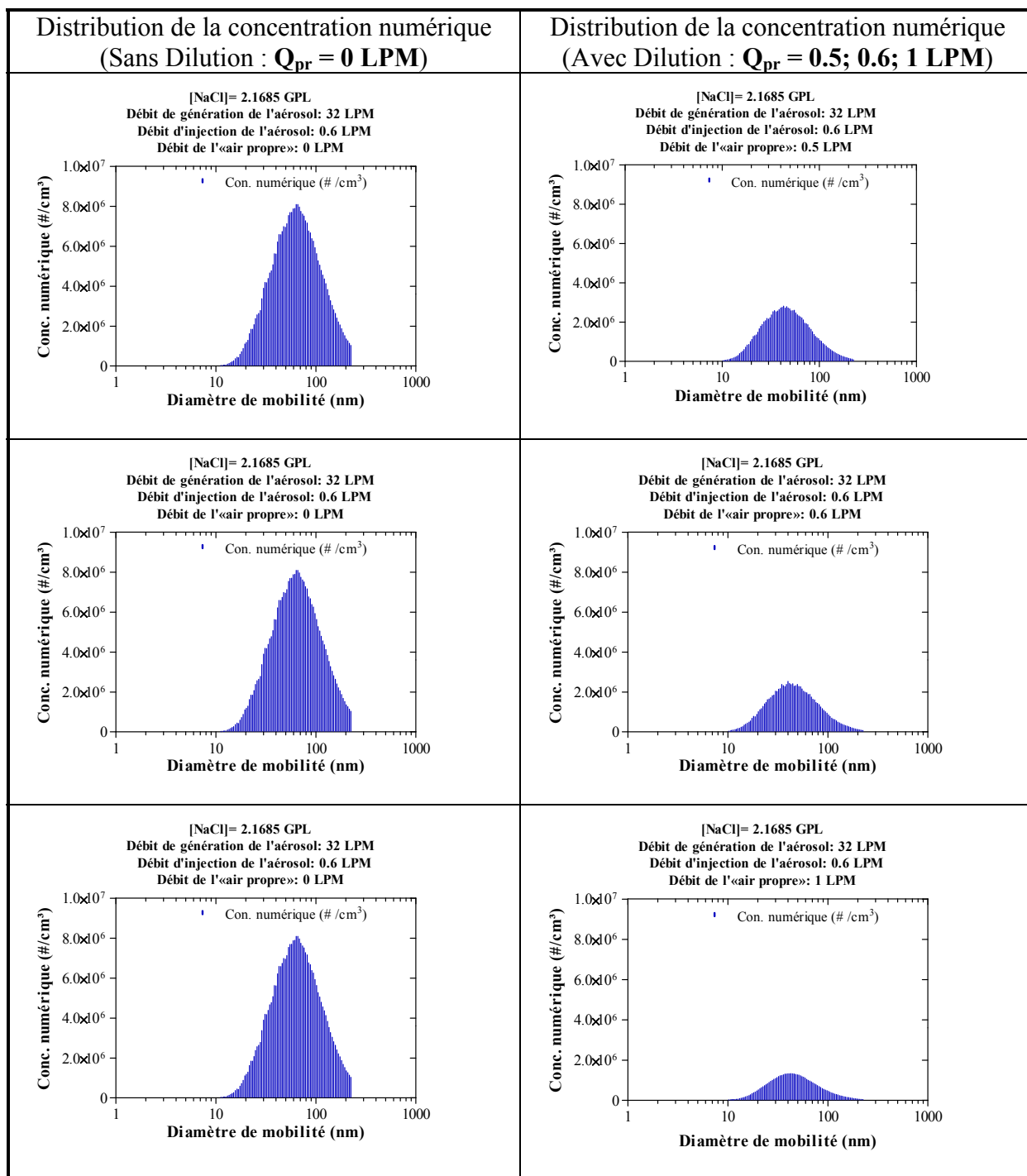


Figure 2.20 Distribution des concentrations d'aérosols NaCl avant dilution et après dilution pour un débit d'«air propre» respectif de 0.5 ; 0.6 ; et 1 LPM

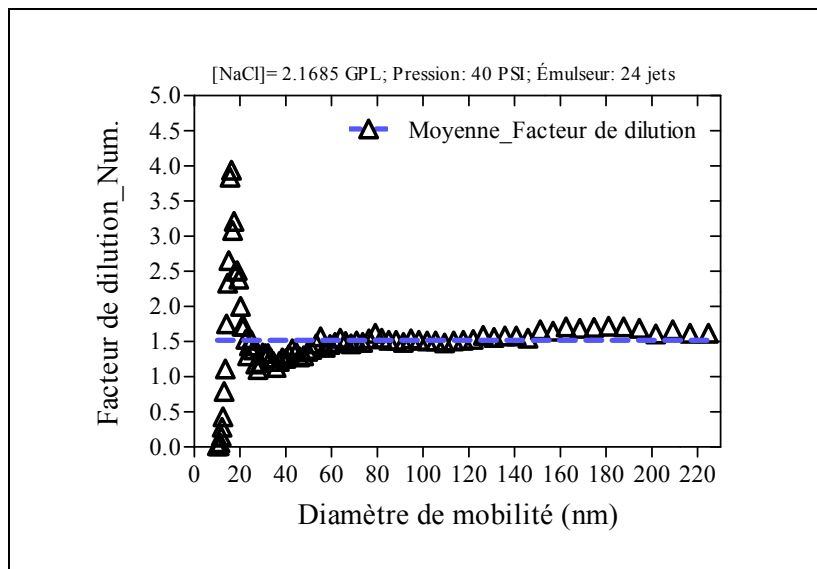


Figure 2.21 Graphique expérimental et droite moyenne du facteur de dilution en fonction du diamètre de mobilité (10-225 nm) pour un débit d'«air propre» constant de 0,2 LPM

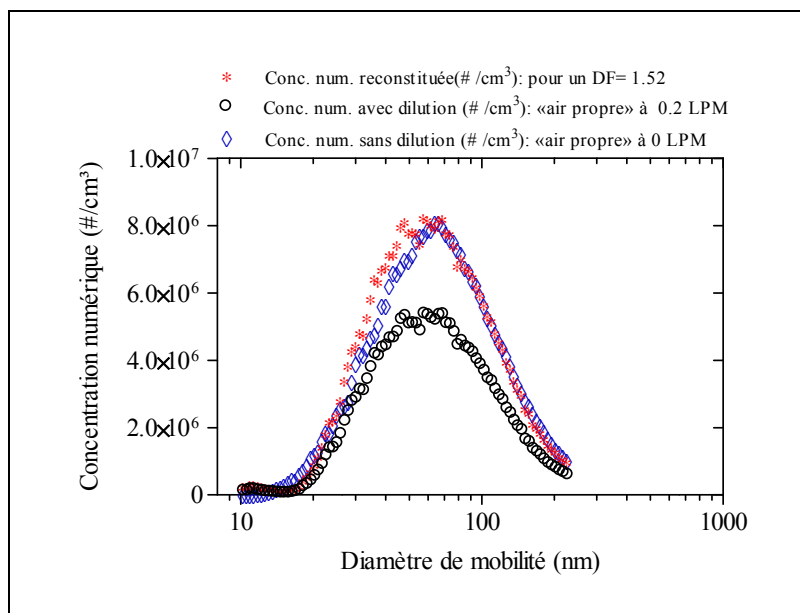


Figure 2.22 Graphique des spectres de concentrations sans dilution, avec dilution et reconstitués à partir du facteur de dilution à 0,2 LPM

2.4 Comportement de la dilution du gaz traceur CO₂

L'étude de la dilution du gaz carbonique permet une comparaison du comportement du gaz traceur CO₂ et des aérosols NaCl au cours de la dilution. L'influence des paramètres de dilution sur la concentration et le facteur de dilution facilite une meilleure compréhension.

2.4.1 L'influence des paramètres de dilution

Elle sera évaluée par l'observation du comportement des concentrations de CO₂ sous l'influence des paramètres de dilution notamment le débit d'injection du gaz carbonique, le débit de l'air «propre» et du pas du débit de l'air «propre»

2.4.1.1 Le comportement du taux de variation de la concentration diluée

Pour une plage de débit d'air «propre» atteignant 3 LPM et un débit de CO₂ (à 100%) de 0.6, 0.8 et 1 LPM, la concentration diluée décroît rapidement jusqu'à tendre vers une valeur presque nulle (Figure 2.23). Le taux de variation de dilution du CO₂ pour les différents débits de CO₂ reste très élevé pour des débits d'air «propre» inférieur à 1.5 LPM. Par contre, pour les débits d'air «propre» supérieurs à 1.5 LPM, les concentrations volumiques de CO₂ sont relativement constantes (Figure 2.24). Les modèles de régression (homographique et exponentielle) des concentrations présentent le même comportement en dilution que celui des aérosols de NaCl. Le modèle homographique est confondu au modèle exponentiel pour les débits d'air «propre» inférieur à 2 LPM. Au-delà de cette valeur, les concentrations diffèrent. C'est-à-dire que le modèle exponentiel présente une décroissance plus importante que le modèle homographique.

2.4.1.2 L'influence du débit de l'air «propre» sur le facteur de dilution

Le facteur de dilution «concentration» et facteur de dilution «débit» ont une croissance linéaire avec l'augmentation du débit de l'air «propre», mais les valeurs expérimentales du facteur de dilution «débit» sont légèrement supérieures au facteur de dilution «concentration» (Figure 2.25, 2.26). La dilution est mieux interprétée lorsque l'on utilise le facteur de dilution «débit», car ce paramètre est plus stable au cours des essais.

2.4.1.3 L'influence du débit d'injection de CO₂ sur le facteur de dilution

Le débit d'injection du CO₂ a une influence significative sur le facteur de dilution «débit» et sur le facteur de dilution «concentration» pour la plage du débit d'«air propre» variant de 0 à 3 LPM (Figures 2.25 et 2.26). Plus le débit du CO₂ est faible plus le mélange a tendance à se diluer rapidement. Ce phénomène a été également observé lors des essais de dilution des aérosols de NaCl. La figure 2.26 montre que le facteur de dilution «concentration» reste très élevé lorsque le débit de CO₂ est à 0.6 LPM. Par contre à 0.8 et 1 LPM ce facteur de dilution est faible et presque semblable. Pour le débit de CO₂ à 0.6 LPM et pour une plage de débits d'«air propre» allant de 0 à 3 LPM. Ici, le facteur de dilution est linéaire (Figures 2.25, 2.26 et 2.27); le facteur de dilution «débit» est confondu avec le facteur de dilution théorique; le facteur de dilution «concentration» sous-estime le facteur de dilution. Il est clair que la dilution présente un comportement stable quel que soit la réponse mesurée.

Pour le débit de CO₂ à 0.8 LPM et pour une plage de débits d'«air propre» allant de 0 à 3 LPM : le facteur de dilution «débit» est rigoureusement linéaire alors que le facteur de dilution «concentration» a tendance à devenir non linéaire pour des débits d'air «propre» supérieur à 1 LPM; le facteur de dilution «débit» est confondu avec le facteur de dilution théorique; le facteur de dilution «concentration» sous-estime le facteur de dilution. La dilution présente un comportement divergent lorsque le débit d'injection du CO₂ est au-delà de 0.8 LPM (Figures 2.27, 2.28). Pour des débits d'injection de CO₂ inférieurs à 0.6 LPM, les faibles débits d'air «propre» entraînent un facteur de dilution constant (Figure 2.29). Au-delà de 1 LPM d'air «propre», le facteur de dilution croît linéairement avec le débit de l'air «propre» (Figure 2.30). Ce phénomène s'interprète par la limite de détection de l'analyseur de gaz et à la vitesse de dilution du mélange au cours de l'analyse. Sur le plan global le facteur de dilution «concentration» ou «débit» présente selon pour les plages de débits d'air «propre» des valeurs qui peuvent aller l'unité à la centaine.

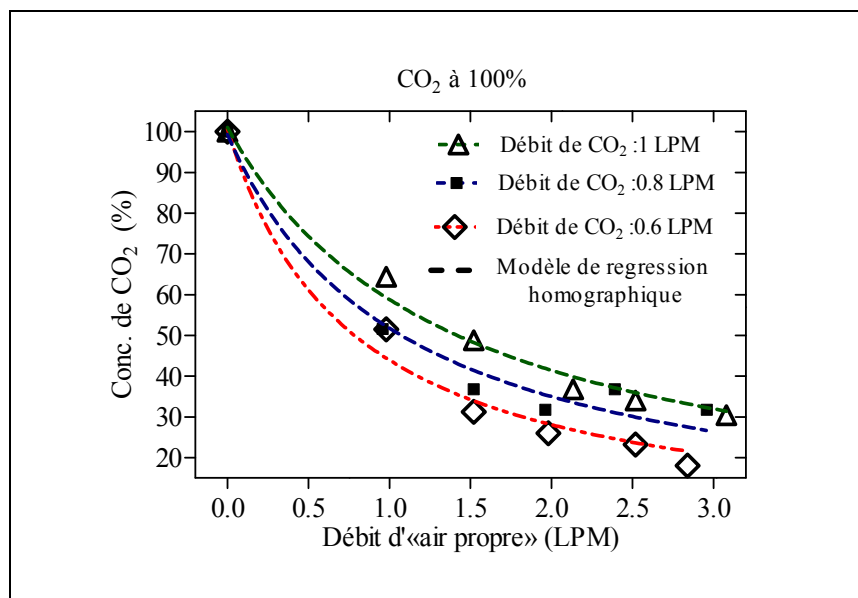


Figure 2.23 Graphique du modèle homographique des concentrations de CO₂ (à 100%) pour des débits variables de CO₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM)

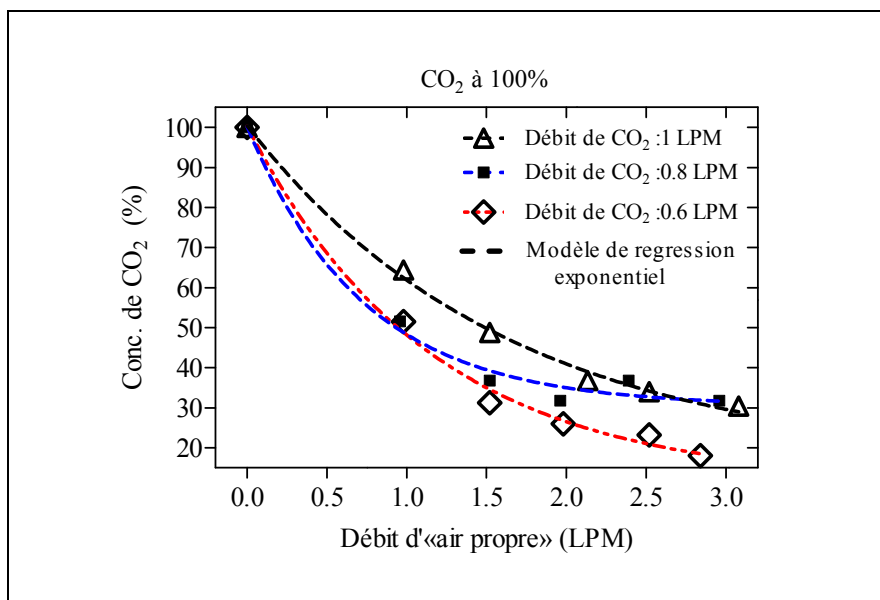


Figure 2.24 Graphique du modèle exponentiel des concentrations de CO₂ (à 100%) pour des débits variables de CO₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM)

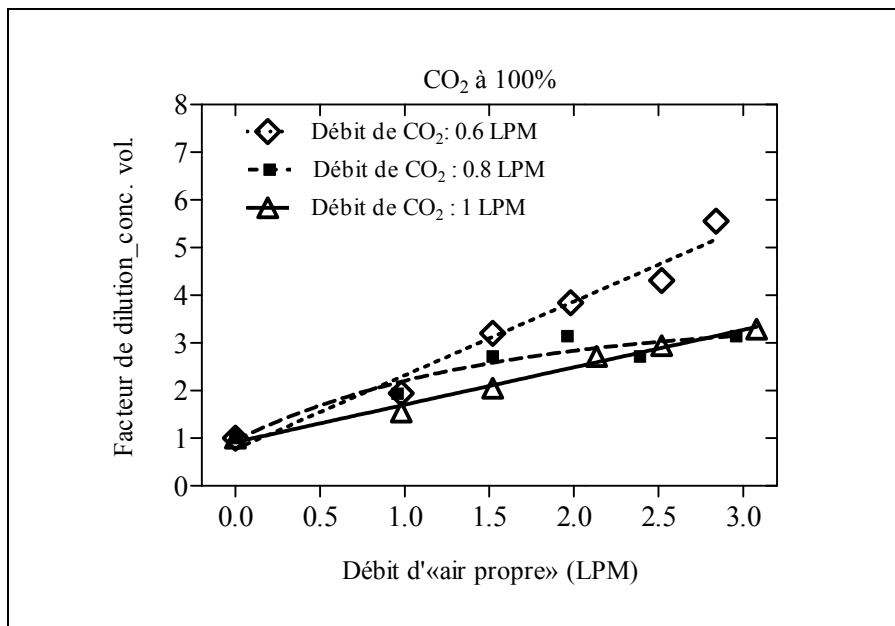


Figure 2.25 Graphiques du facteur de dilution «concentration» pour une injection à 100% de CO₂ et pour de débits variables de CO₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM)

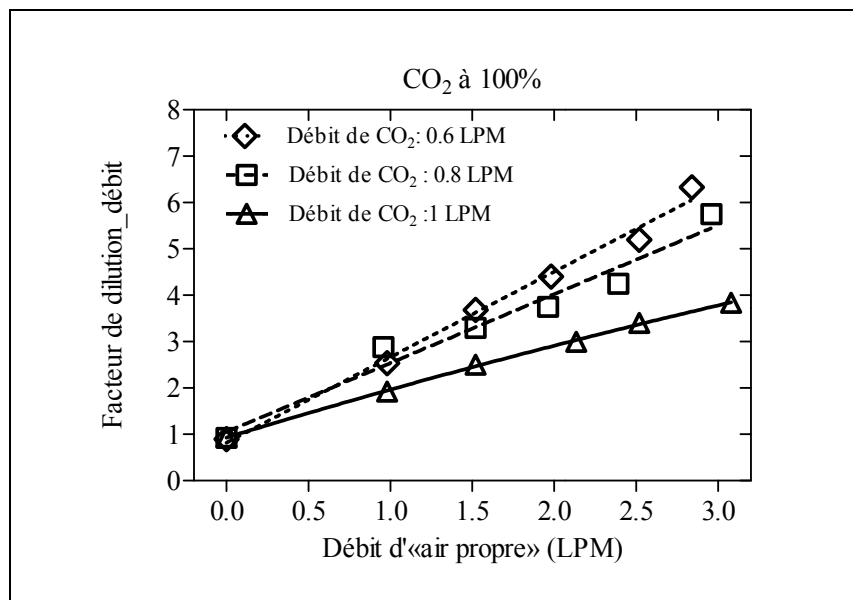


Figure 2.26 Graphiques du facteur de dilution «débit» pour une injection à 100% de CO₂ et pour de débits variables de CO₂ (0.6, 0.8, et 1 LPM)

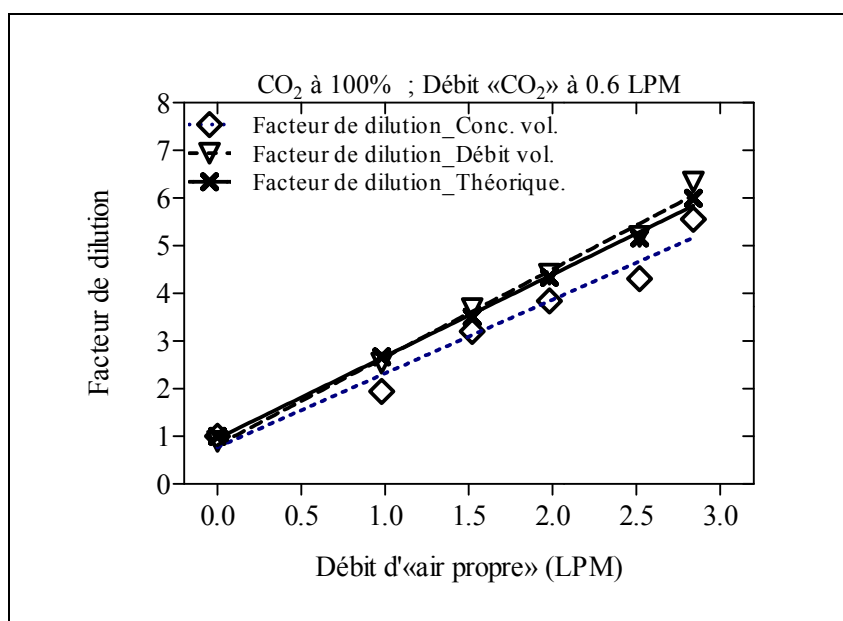


Figure 2.27 Graphiques des facteurs de dilution «concentration», «débit» et «théorique» pour 100% de CO₂ à débit d'injection de 0.6 LPM

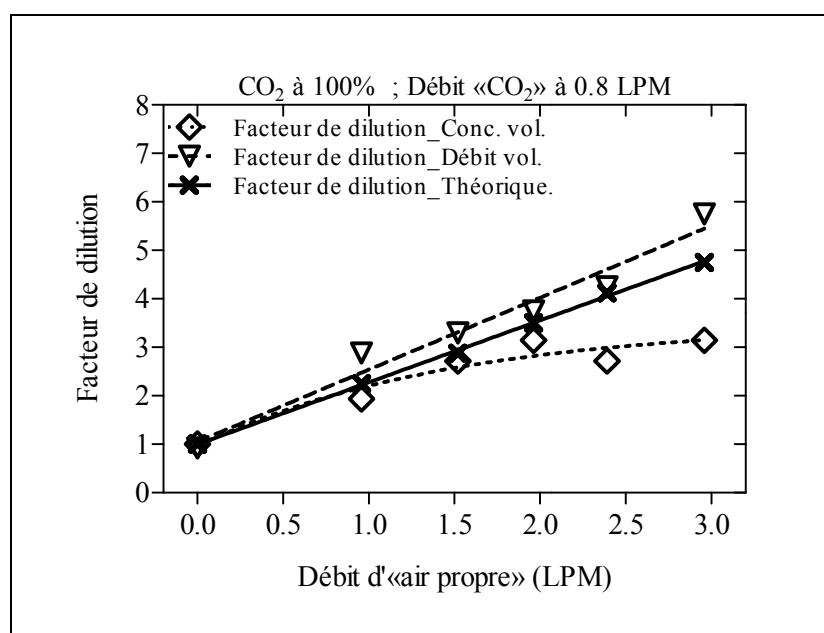


Figure 2.28 Graphiques des facteurs de dilution «concentration», «débit» et «théorique» pour 100% de CO₂ avec le débit d'injection de CO₂ à 0.8 LPM

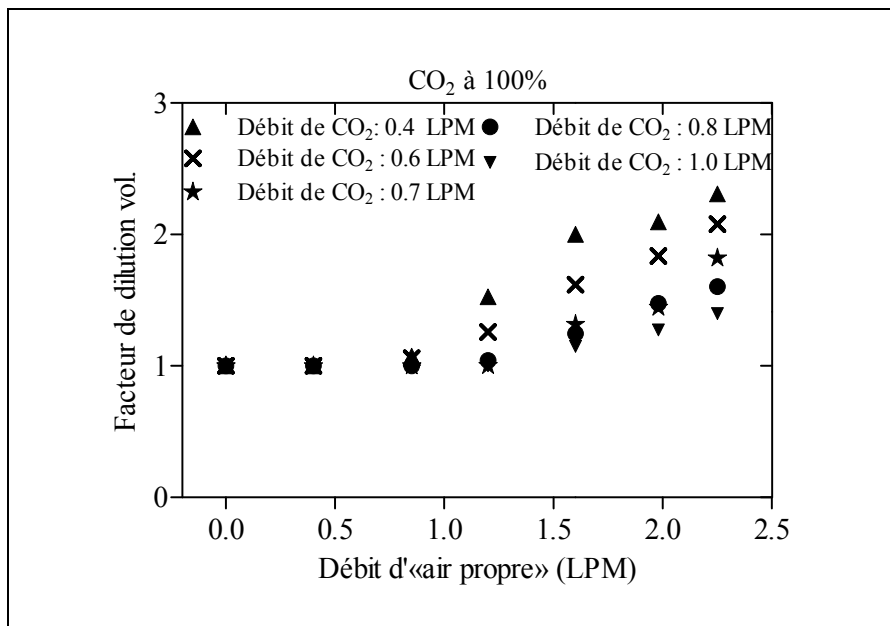


Figure 2.29 Graphiques du facteur de dilution «concentration» pour des débits d'air «propre» inférieur à 2.5 LPM, à 100% de CO₂ et avec des débits d'injection de CO₂ variables

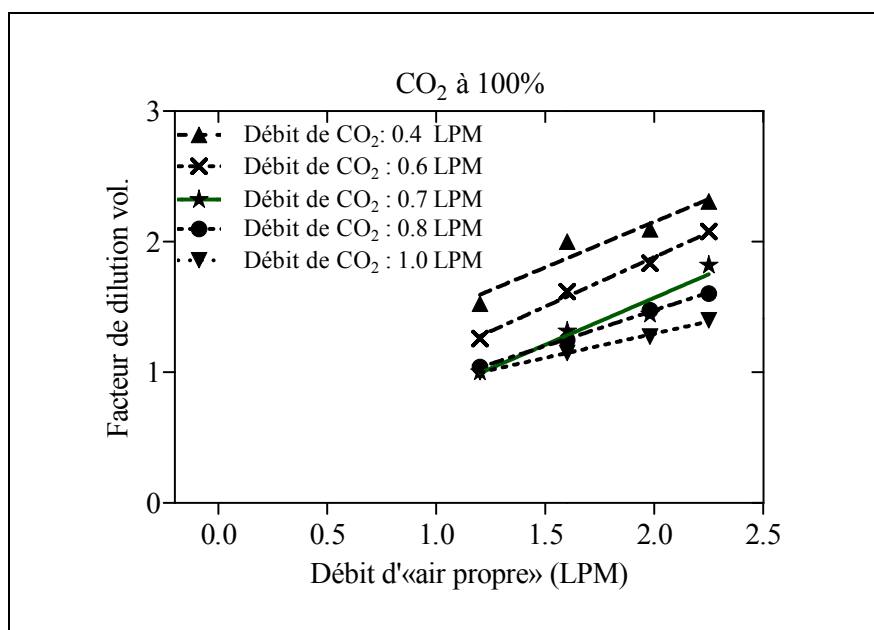


Figure 2.30 Graphiques du facteur de dilution «concentration» pour des débits d'air «propre» supérieur à 1LPM, à 100% de CO₂ et à de débits variables : 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, et 1 LPM

Dans le cas où la concentration d'injection du CO₂ n'est plus à 100%, la prédilution se fera dans une chambre verticale pour abaisser les concentrations de CO₂ aux valeurs respectives de 90%, 75%, 60% et 50%. Ces injections de CO₂ ont été testées pour les débits de l'ordre de un centième de LPM (0.09, 0.06 et 0.02 LPM). Les résultats ont montré une décroissance rapide des concentrations de CO₂ pour les débits d'injection de CO₂ de l'ordre du «un centième» de LPM. Plus le débit d'injection du CO₂ était faible et la concentration initiale de CO₂ faible, moins la décroissance était élevée (Figure 2.31). Pour un débit d'injection de CO₂ de l'ordre du « un dixième » de LPM, et pour des concentrations initiales de CO₂ faibles (inférieur à 60%), le comportement des concentrations est marqué par une décroissance linéaire (Figure 2.32). Quant au facteur de dilution, à des débits d'injection de CO₂ de l'ordre du «un centième» de LPM, le comportement du facteur de dilution n'est plus linéaire. Le facteur de dilution a tendance à croître rapidement pour atteindre un maximum de 14 à 0.5 LPM de débit d'air «propre» (Figure 2.33).

Le comportement linéaire commence à être observé pour des débits d'injection de CO₂ de l'ordre du «un dixième» de LPM (Figure 2.34). Le facteur de dilution pour les débits d'injection de CO₂ relativement faibles (de l'ordre du «un centième») est non linéaire quel que soit la concentration de CO₂ au départ de la dilution. Le facteur de dilution pour les débits d'injection de CO₂ de l'ordre du «un dixième» est presque linéaire quel que soit la concentration de CO₂ au départ de la dilution. Nous arrivons à la conclusion selon laquelle, le maximum de dilution peut être atteint si les débits faibles de CO₂ sont injectés. Par exemple, en émettant l'hypothèse d'une relation homographique entre le débit d'air «pollué» et le débit d'air «propre» :

$$Q_p = \frac{1}{a - bQ_{pr}} \quad (2.36)$$

avec a, b sont des constantes supérieurs à zéro.

$$DF_T = f(Q_{pr}) = 1 + (a - bQ_{pr}).Q_{pr} = -bQ_{pr}^2 + aQ_{pr} + 1 \quad (2.37)$$

En dérivant la fonction DF_T , on obtient un maximum de dilution

$$f'(Q_{pr}) = -2bQ_{pr} + a = 0 \Rightarrow Q_{pr} = \frac{a}{2b}$$

$$DF_{TMax} = 1 + \frac{a^2}{4b} \quad (2.38)$$

Dans le cas du système de dilution DDS 560 (Annexe 2), le maximum de dilution est obtenu expérimentalement à : $DF_{TMax} = 371$ et $Q_{pr} = 1\text{LPM}$.

Les coefficients a et b peuvent s'obtenir par la résolution de l'équation 2.39

$$\begin{aligned} 371 &= 1 + \frac{a^2}{4b} \\ \Rightarrow a &= \sqrt{1480b} \approx 38,47\sqrt{b} \end{aligned} \quad (2.39)$$

On obtient les coefficients a et b du modèle en admettant que sur la courbe expérimentale de la figure 2.13, le débit d'air propre à injecter pour obtenir le facteur de dilution maximal est 1 LPM pour un diluteur DDS 550 (Annexe). Cela se traduit par l'équation 2.37

$$Q_{pr} \approx \frac{38,47\sqrt{b}}{2b} = \frac{38,47}{2\sqrt{b}} = 1 \quad (2.40)$$

Les valeurs des coefficients a et b seront : $a \approx 740$; $b \approx 370$

$$Q_p = \frac{1}{a - bQ_{pr}} = \frac{1}{740 - 370 \times 1} \approx 3$$

Le débit de l'air pollué est de trois ml par minute pour les coefficients trouvés. Ainsi, pour obtenir un facteur de dilution très élevé, il faudrait que le débit d'air «pollué» soit de l'ordre du mLPM alors que le débit de l'air «propre» sera de l'ordre du LPM.

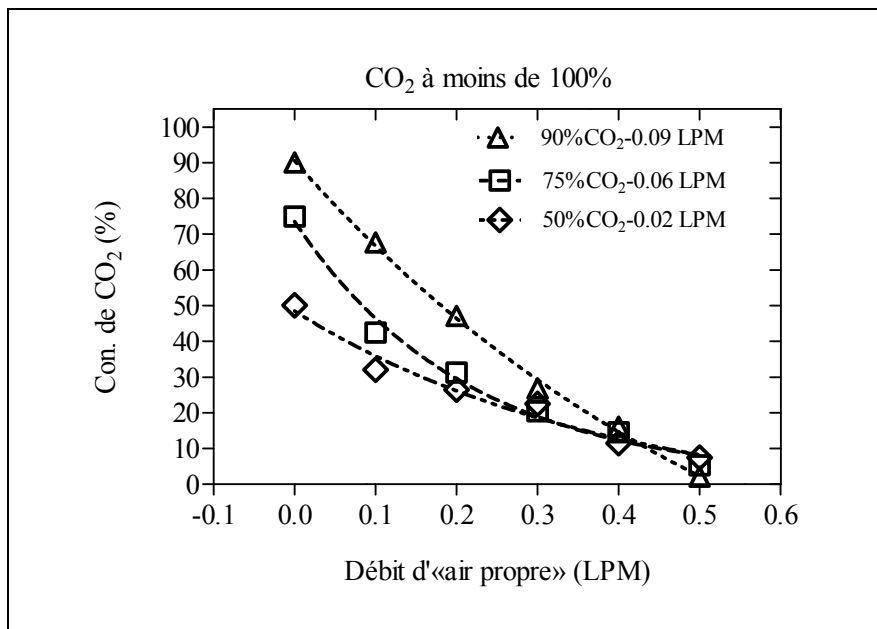


Figure 2.31 Graphiques des concentrations diluées à différents pourcentages de CO₂ avec des débits variables

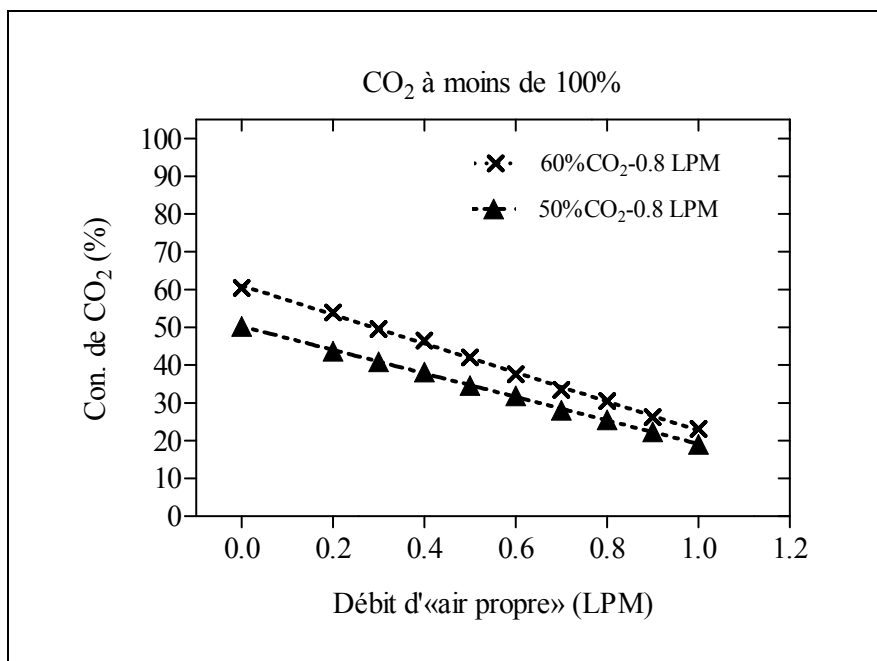


Figure 2.32 Graphiques des concentrations diluées à différents pourcentages de CO₂ à un débit constant

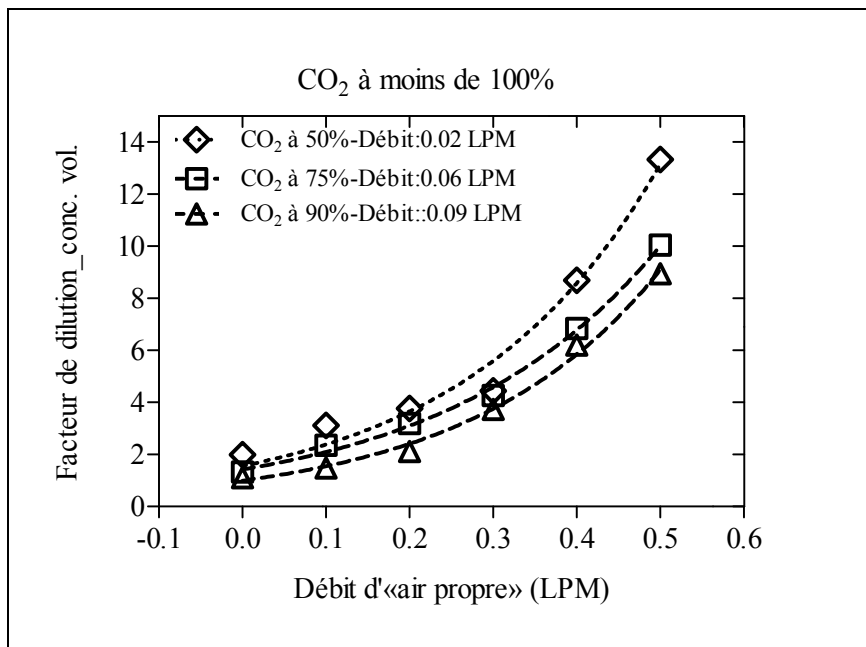


Figure 2.33 Graphiques d'évolution des facteurs de dilution à des concentrations différentes de CO₂, à des débits d'injection de CO₂ très faibles

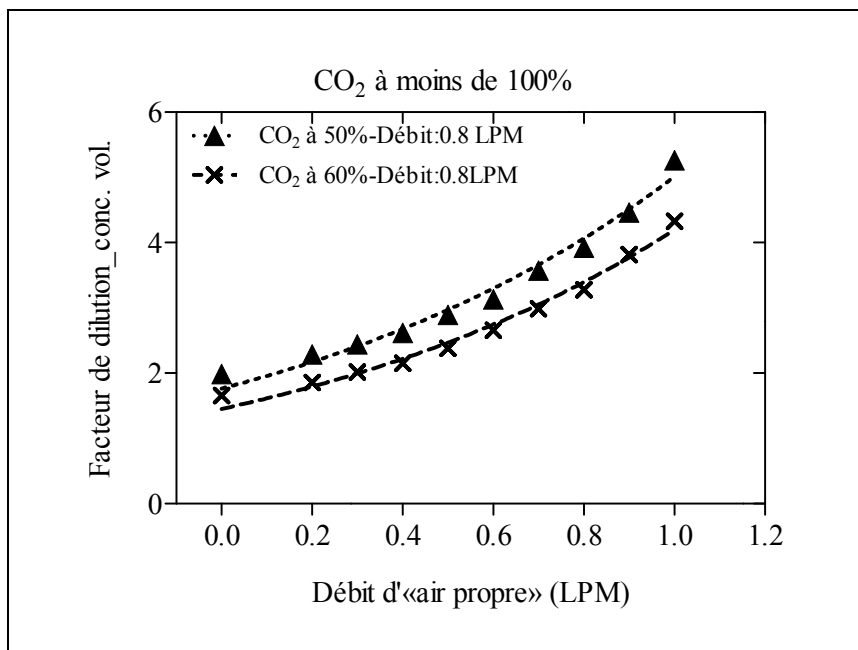


Figure 2.34 Graphiques d'évolution des facteurs de dilution à des concentrations différentes de CO₂ et à un débit d'injection du CO₂ constant

2.4.2 Modèles de régression pour le facteur de dilution du CO₂

Ces modèles sont obtenues à partir des points expérimentaux des essais de dilution. Elles se différencient selon les conditions de dilution notamment celles concernant les débits d'injection de gaz carbonique de 0.6, 0.8, et 1 LPM, les débits d'«air propre» de 0 à 3 LPM et le pas (0.25 ou 0.5 LPM).

2.4.2.1 Modèles de régression pour les débits d'injection de gaz carbonique de 0.6, 0.8, et 1 LPM et les débits d'«air propre» de 0 à 3 LPM

Ainsi aux débits d'injection de l'ordre de 0.6, 0.8, et 1 LPM, deux modèles de régression permettent de prédire les variations de la concentration au cours de la dilution notamment :

- le modèle homographique pour les débits d'injection respectifs de 0.6, 0.8, et 1 LPM permet de prédire la concentration diluée avec un coefficient de corrélation de 98.41%, 97.27%, 98.81% pour un intervalle de confiance à 95%.

À 0.6 LPM,

$$C_s = f(Q_{pr}) = \frac{100.7 \times 0.7728}{Q_{pr} + 0.7728} \quad (2.41)$$

À 0.8 LPM,

$$C_s = f(Q_{pr}) = \frac{99.34 \times 1.086}{Q_{pr} + 1.086} \quad (2.42)$$

À 1 LPM,

$$C_s = f(Q_{pr}) = \frac{101.1 \times 1.388}{Q_{pr} + 1.388} \quad (2.43)$$

- le modèle exponentiel permet également de prédire la concentration diluée pour les débits d'injection respectifs de 0.6, 0.8, et 1 LPM. Le coefficient de corrélation respectif obtenu pour les trois modèles est de 99.48%, 98.96%, 99.68% pour un intervalle de confiance à 95%.

À 0.6 LPM,

$$C_s = (89.14)e^{-0.8798 Q_{pr}} + 11.17 \quad (2.44)$$

À 0.8 LPM,

$$C_s = (69.79)e^{-1.362 Q_{pr}} + 30.42 \quad (2.45)$$

À 1 LPM,

$$C_s = (84.28)e^{-0.6117 Q_{pr}} + 16.14 \quad (2.46)$$

2.4.2.2 Modèles de régression aux débits d'injection de gaz carbonique de 0.6, 0.8, et 1 LPM pour les débits d'air «propre» faibles (0 à 1.2 LPM)

Lorsque le débit d'«air propre» est inférieur à 1 LPM et le pas du débit réduit de moitié, alors le taux de variation de la dilution du CO₂ est nul. Pour le débit d'«air propre» supérieur à 1LPM, le taux de variation de la dilution du CO₂ est constant.

Le modèle de concentration diluée du gaz traceur CO₂ est constant lorsque le débit de l'«air propre» est inférieur à 1LPM et est linéaire lorsque le débit de l'«air propre» est supérieur à 1LPM. Le modèle de concentration diluée s'écrit :

$$C_s = \begin{cases} 100 & , \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ A Q_{pr} + B & , \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.47)$$

avec A, B des constantes.

Le modèle théorique est une tendance homographique ou exponentielle de variation des concentrations :

$$C_s = \begin{cases} 100 & , \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ \frac{AB}{Q_{pr} + B} & , \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.48)$$

$$C_s = \begin{cases} 100 & , \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (A - B)e^{-CQ_{pr}} + B & , \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.49)$$

Avec A, B, et C des constantes.

À ce titre, pour les débits respectifs d'injection de CO₂ : 0.4, 0.6, 0.7, 0.8 et 1LPM avec des débits d'«air propre» variant de 0 à 2.5 LPM, Le modèle linéaire avec plateau est la meilleure régression linéaire permettant de prédire la concentration volumique diluée :

- À un débit de CO₂ de 0.4 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 88.28%, un F_value de 15.06 et un p_value de 0.0604 (>0.05). Le modèle est peu significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$C_s = \begin{cases} 100 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (-19.84 \pm 5.112) Q_{pr} + (86.49 \pm 9.211) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.50)$$

- À un débit de CO₂ de 0.6 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 96.11%, un F_value de 49.38 et un p_value de 0.0197 (<0.05). Le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$C_s = \begin{cases} 100 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (-28.93 \pm 4.117) Q_{pr} + (111.8 \pm 7.417) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.51)$$

- À un débit de CO₂ de 0.7 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 95.84%, un F_value de 46.10 et un p_value de 0.021 (<0.05). Le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$C_s = \begin{cases} 100 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (-40.02 \pm 5.894) Q_{pr} + (145.3 \pm 10.62) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.52)$$

- À un débit de CO₂ de 0.8 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 98.50%, un F_value de 131.7 et un p_value de 0.0075 (<0.05). Le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$C_s = \begin{cases} 100 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (-32.59 \pm 2.840) Q_{pr} + (133.9 \pm 5.116) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.53)$$

- À un débit de CO₂ de 1 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 99.41%, un F_value de 334.9 et un p_value de 0.0030 (<0.05). Le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$C_s = \begin{cases} 100 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (-26.55 \pm 1.451) Q_{pr} + (130.8 \pm 2.614) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.54)$$

Globalement le modèle linéaire est très significatif pour les concentrations diluées, sauf pour le cas où le débit d'injection du CO₂ est inférieur ou égal à 0.4 LPM. Ce modèle linéaire n'est pas conforme à la théorie qui prédit un modèle hyperbolique ou exponentiel. Toutefois le modèle linéaire convient au mieux pour les plages de débits choisies. Aux débits respectifs d'injection de CO₂, nous avons choisi un modèle linéaire avec plateau pour prédire le facteur de dilution volumique :

- À un débit de CO₂ de 0.4 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 93.09%, un F_value de 26.93 et un p_value de 0.0352 (<0.05). Ces paramètres statistiques montrent que le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$DF_r = \begin{cases} 1 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (0.6974 \pm 0.1344) Q_{pr} + (0.7575 \pm 0.2421) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.55)$$

- À un débit de CO₂ de 0.6 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 99.23%, un F_value de 258.3 et un p_value de 0.0038 (<0.05). Ces paramètres statistiques montrent que le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$DF_r = \begin{cases} 1 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (0.7560 \pm 0.04704) Q_{pr} + (0.3697 \pm 0.08475) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.56)$$

- À un débit de CO₂ de 0.7LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 94.61%, un F_value de 35.14 et un p_value de 0.0273 (<0.05). Ces paramètres statistiques montrent que le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$DF_r = \begin{cases} 1 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (0.7204 \pm 0.1215) Q_{pr} + (0.1302 \pm 0.2190) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.57)$$

- À un débit de CO₂ de 0.8 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 99.84%, un F_value de 1286 et un p_value de 0.0008 (<0.05). Ces paramètres statistiques montrent que le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%.

$$DF_T = \begin{cases} 1 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (0.5453 \pm 0.01521)Q_{pr} + (0.3837 \pm 0.02740) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.58)$$

- À un débit de CO₂ de 1 LPM, le modèle ci-après a été obtenu avec un coefficient de corrélation de 99.62%, un F_value de 529.0 et un p_value de 0.0019 (<0.05). Ces paramètres statistiques montrent que le modèle est très significatif à un intervalle de confiance de 95%

$$DF_T = \begin{cases} 1 & \text{si } Q_{pr} \leq 1\text{LPM} \\ (0.3709 \pm 0.01613) Q_{pr} + (0,5544 \pm 0,02906) & \text{si } Q_{pr} > 1\text{LPM} \end{cases} \quad (2.59)$$

Pour les débits de CO₂ de l'ordre du centième de LPM, le facteur de dilution-concentration peut atteindre 14 pour le diluteur considéré. Le modèle de dilution est exponentiel croissant pour les débits de CO₂ de l'ordre du centième et respectivement à des concentrations de CO₂ de 50%, 75% et 90%. Ces modèles sont très significatifs, car ils présentent dans l'intervalle de confiance de 95%, un coefficient de corrélation respectif de 97.98%, 98.54%.

$$DF_C = (1.763)e^{1.044 Q_{pr}} ; DF_C = (1.452)e^{1.061 Q_{pr}} \quad (2.60)$$

Le modèle de dilution est exponentiel pour les débits de CO₂ de l'ordre du dixième et respectivement à des concentrations de CO₂ de 50% et 60%. Ces modèles sont très significatifs, car ils présentent dans l'intervalle de confiance de 95%, un coefficient de corrélation respectif de 97.91%, 99.65%, et 99.46%.

$$DF_C = (1.553)e^{4.272 Q_{pr}} ; DF_C = (1.42)e^{3.909 Q_{pr}} ; DF_C = (0.9955)e^{4.425 Q_{pr}} \quad (2.61)$$

2.4.3 Comparaison de la dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO₂

Cette comparaison permettra d'observer l'impact des deux paramètres dans le comportement des aérosols et du gaz traceur. Cette opération est d'autant plus utile que dans la pratique quotidienne, la substitution des aérosols par le gaz traceur CO₂ dans les études est d'usage courant. Une étude comparative du facteur de dilution (Figure 2.35) et du taux de dilution (Figure 2.36) montre que le facteur de dilution du gaz traceur CO₂ (dans les conditions expérimentales considérées) est proche du facteur de dilution théorique. Par contre, le facteur de dilution des aérosols et le taux de dilution des aérosols (de diamètre de mobilité compris entre 20 et 225 nm) ont tendance à s'éloigner du facteur de dilution théorique.

L'interprétation à donner à ce phénomène est lié au comportement physique des molécules d'un gaz par rapport au comportement des aérosols de tailles nanométriques. En réalité, un aérosol considéré de façon individuelle au sein d'une population peut prendre des formes, des structures et des tailles très variables, contrairement aux molécules qui sont uniformes tant dans leur forme que leur dynamique. Cette variabilité de l'aérosol influence grandement ses transformations chimiques, physiques et thermodynamiques au cours de leur dilution ou de leur transport. L'évolution d'une population d'aérosols au cours de la dilution ou du transport repose sur le fait qu'entre deux instants où un même volume de mélange est prélevé, les modes de la distribution granulométrique auront changé de paramètres, révélant ainsi une augmentation du nombre d'aérosols ou une diminution, un accroissement du diamètre de certaines particules ou au contraire une diminution.

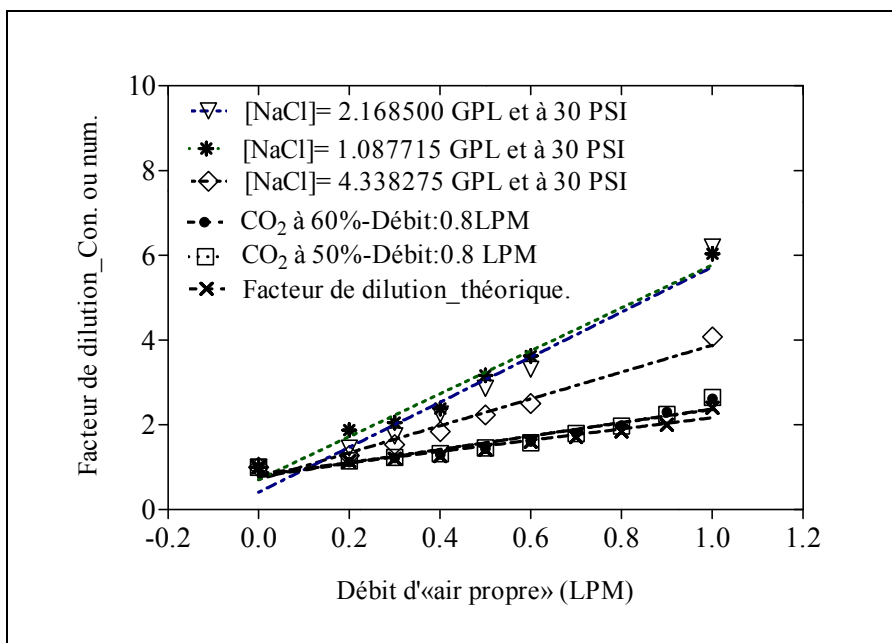


Figure 2.35 Graphiques du facteur de dilution des aérosols NaCl à la pression de 30 PSI comparé à celui du gaz traceur CO₂ avec un débit d'injection de 0.8 LPM

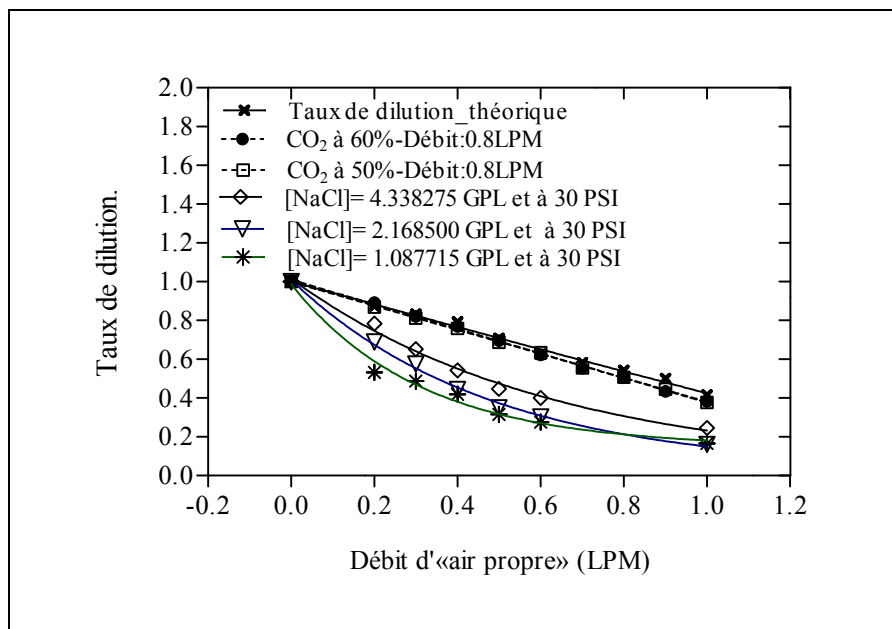


Figure 2.36 Graphiques du taux de dilution des aérosols NaCl à la pression de 30 PSI comparé à celui du gaz traceur CO₂ avec un débit d'injection de 0.8 LPM

2.5 Conclusion partielle

Ce chapitre nous a permis de mener des essais de dilution selon un plan expérimental complet où l'influence des paramètres de dilution a été observée (pression d'émulsion, débit d'injection de l'air «pollué», débit d'injection de l'air «propre», concentration initiale du polluant, et de la concentration de la solution aqueuse). Le facteur de dilution d'un polluant (aérosols ou gaz) dépend des caractéristiques du polluant (taille, composition chimique, ...), de la concentration d'injection du polluant, du débit d'injection du polluant et du débit de l'air «propre». Le facteur de dilution n'est pas linéaire comme le montre la théorie de la mécanique des fluides (Équation 2.18). Les essais nous montrent que selon le type de polluant le facteur de dilution peut être prédit par un modèle non linéaire de type exponentiel. Ainsi pour obtenir des facteurs de dilution élevés (de l'ordre de la centaine ou du millier), il est obligatoire d'utiliser des débits de polluants très faibles. Mais cela n'est pas facile sur le plan expérimental où les débitmètres sont parfois limités par leurs systèmes de lecture. Ce deuxième chapitre aura également permis de montrer que le comportement du gaz traceur et des aérosols de NaCl diffèrent dans le processus de dilution. L'observation du comportement des aérosols de NaCl permet de conclure qu'il peut se diluer plus rapidement qu'un gaz traceur pour un même débit d'air propre injecté. Le comportement du gaz traceur est très proche du modèle théorique étudié en mécanique des fluides, ce qui laisserait croire qu'il serait prudent pour les chercheurs en qualité de l'air d'utiliser le gaz traceur pour étudier le comportement des aérosols en ventilation ou dans tout autre étude portant sur l'exposition aux poussières. Deux modèles prédiction du facteur dilution sont en compétition avec des coefficients de corrélation supérieurs à 90%. Mais, il ressort des essais réalisés que le modèle exponentiel semble mieux prédire le comportement en dilution des aérosols et des gaz. Dans le troisième chapitre, le facteur de dilution maximal (de valeur 5) correspondant à un débit d'air «propre» d'environ 1 LPM, sera utilisé pour l'échantillonnage des poussières PM_{2.5} au polissage linéaire sous des fortes concentrations. Dans cette logique, il sera question d'analyser les concentrations temporelles obtenues «sans dilution» et «avec dilution» dans le troisième chapitre.

CHAPITRE 3

APPLICATION À L'ÉMISSION DES POUSSIÈRES PM_{2.5}

Ce chapitre présente la dilution dans une situation d'échantillonnage à fortes concentrations au cours du polissage des granites. Les paramètres de dilution sont celles fournies par les méthodes de dilution des aérosols. L'expérimentation est orientée vers la validité du facteur de dilution d'une part et l'utilisation de ce facteur de dilution pour approcher avec une bonne précision d'autre part.

3.1 Matériel et méthodes

Le matériel utilisé dans le cadre des essais de polissage se regroupe dans les composants du banc d'essai de polissage linéaire muni d'un dispositif d'échantillonnage des poussières (Figure 3.1). Les méthodes exploitées concerneront le choix du type de polissage et de l'abrasif, le choix de la plage de charge manuelle exercée par l'ouvrier polisseur, le type plan expérimental utilisé, l'approche d'estimation et de modélisation du taux d'émission des poussières au cours du polissage du granite.

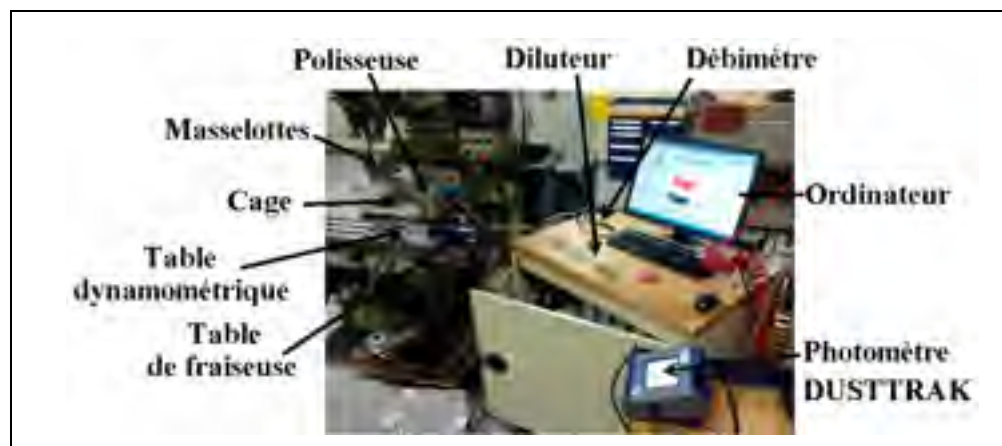


Figure 3.1 Photo du dispositif expérimental d'essai de polissage et de dilution

3.1.1 Matériel des essais de polissage et d'échantillonnage des poussières

Le matériel indiqué à la figure 3.1 comprend la polisseuse, la table dynamométrique, le profilomètre, le photomètre DUSTTRAK, les accessoires d'échantillonnage et de mesurage des débits.

3.1.1.1 La polisseuse, la table dynamométrique et l'échantillon de granite

Il comporte une polisseuse linéaire à bande MAKITA #9031, une cage à poussières, des bandes abrasives de grade P60, une table dynamométrique KISTLER #4955B, une table de fraiseuse et des échantillons de granite. Les échantillons de granites respectivement de couleur blanche et noire seront des blocs de 153 x 153 x 30 mm (Figure 3.2a, b) préalablement meulés avec rugosité arithmétique constante d'environ 6 μm . Ils seront ensuite divisés en quatre parties de surfaces égales et correspondants aux zones d'application des différentes charges normales (46, 51, 56, 61 N) avec une vitesse de coupe constante (880 m/min). Ces valeurs comprennent la charge initiale de la polisseuse (21 N soit 2.1 kg). La surface de l'échantillon de granit sera préparée par meulage à une rugosité arithmétique moyenne de $6 \pm 1.5 \mu\text{m}$. La masse de l'échantillon de granit sera mesurée avant et après polissage à l'aide d'une balance de précision au microgramme, afin d'estimer la perte de masse en terme d'enlèvement de la matière. Les conditions de polissage permettent de distinguer quatre zones d'application de la charge normale (Tableau 3.1).

3.1.1.2 Le profilomètre Mitutoyo® SJ-400

Les états de surfaces seront mesurés avant et après chaque essai de polissage pour mesurer le niveau d'atteinte de l'état de surface poli et commerciale. Le profilomètre de rugosité (Mitutoyo® SurfTestt SJ-400) est muni d'un outil de traitement numérique des mesures utilisant le programme d'analyse de surface de rugosité SURFPAK-SJ (Figure 3.3). La mesure de la rugosité de chaque échantillon sera réalisée sur au moins quatre points différents des quatre zones de coupe ou de charge. Le profilomètre de rugosité sera calibrée en utilisant un spécimen de référence de Mitutoyo® SurfTestt SJ-400.

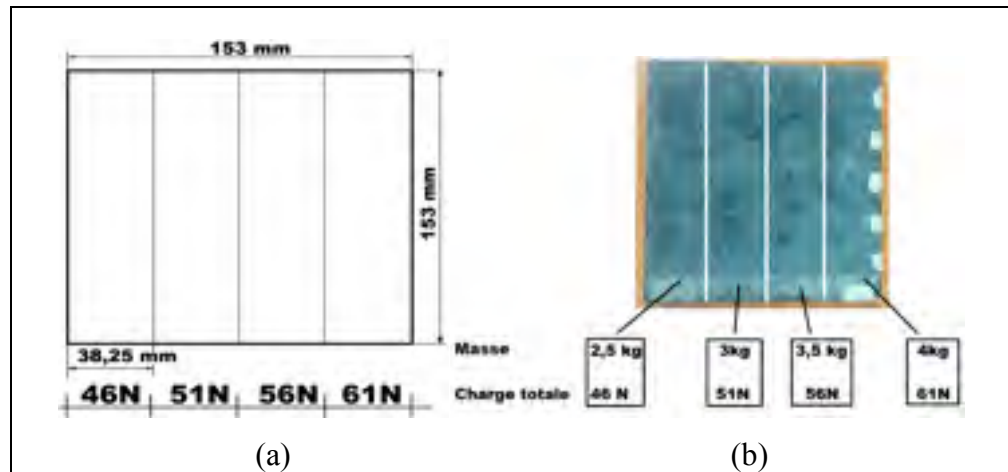


Figure 3.2 Échantillon de granites : (a) Croquis et (b) photo

Tableau 3.1 Conditions de polissage

Échantillons	Granit «blanc»				Granit «noir»			
Zone/Charge : (Z_Charge)	Z_46	Z_51	Z_56	Z_61	Z_46	Z_51	Z_56	Z_61
Vitesse de coupe : V_c (m/min)	880				880			
État de surface initial : R_a (μm)	6				6			

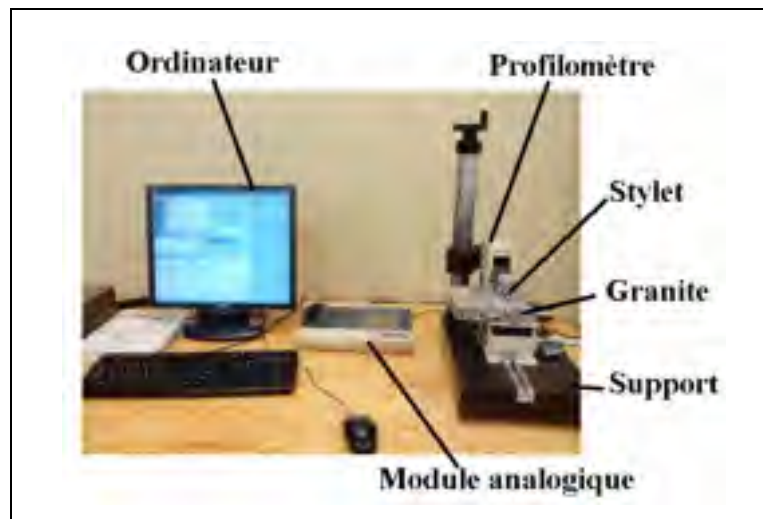


Figure 3.3 Photo du profilomètre Mitutoyo® SJ-400

3.1.1.3 Le photomètre DUSTTRAK

Le dispositif de mesure des concentrations massiques est un photomètre DUSTTRAK # 8530 munie d'un impacteur 1, 2.5, 4 et 10 μm (Figure 3.4a). Il mesure la concentration des aérosols à travers la détection de la lumière diffusée à 90 degrés dans un certain volume échantillonné (Figure 3.4b). Un ensemble optique comportant une source de lumière, une diode LASER, des lentilles, un collecteur optique et un photodétecteur, permet de compter les particules du volume et d'afficher la concentration massique par un programme de traitement de signal. L'aérosol aspiré par la pompe à 1.5 LPM passe par un impacteur 2.5 μm qui permet de sélectionner les diamètres aérodynamiques inférieurs à la valeur marquée sur celui-ci. L'aérosol est ensuite compté par le dispositif LASER puis filtré avant d'être évacué dans l'air ambiant (Figure 3.4c). Le photomètre DUSTTRAK présente les caractéristiques suivantes :

- la plage des concentrations 0.001 à 400 mg/m^3 ;
- sa précision de mesure de $\pm 0.1\%$;
- la stabilité au zéro est $\pm 0.002 \text{ mg}/\text{m}^3$ toutes les 24 h à la constante de temps 10 s ;
- le débit d'utilisation est de 1.5 LPM $\pm 5\%$;
- le coefficient de température est de 0.001 mg/m^3 par $^{\circ}\text{C}$;
- la température de fonctionnement varie de 0 à 50 $^{\circ}\text{C}$;
- l'humidité de fonctionnement acceptable est de 0 à 95% d'humidité relative (HR).

Le photomètre DUSTTRAK est calibré pour un aérosol arbitraire en ajustant le facteur de calibrage personnalisé. Ainsi, le facteur de calibrage personnalisé est égal à l'unité pour l'étalonnage par TSI à la poussière de test standard ISO. Il est étalonné par le fabricant avec des particules répondant à la norme ISO 12103-1. Le DUSTTRAK #8530 est calibré par le fabricant TSI à la fraction inhalable selon la norme ISO 12103-1. Un photomètre DUSTTRAK #8530 de débit maximal 1.5 l/min permettant la lecture temporelle des concentrations de poussières de diamètre aérodynamique inférieur à 2.5 μm (PM 2.5).

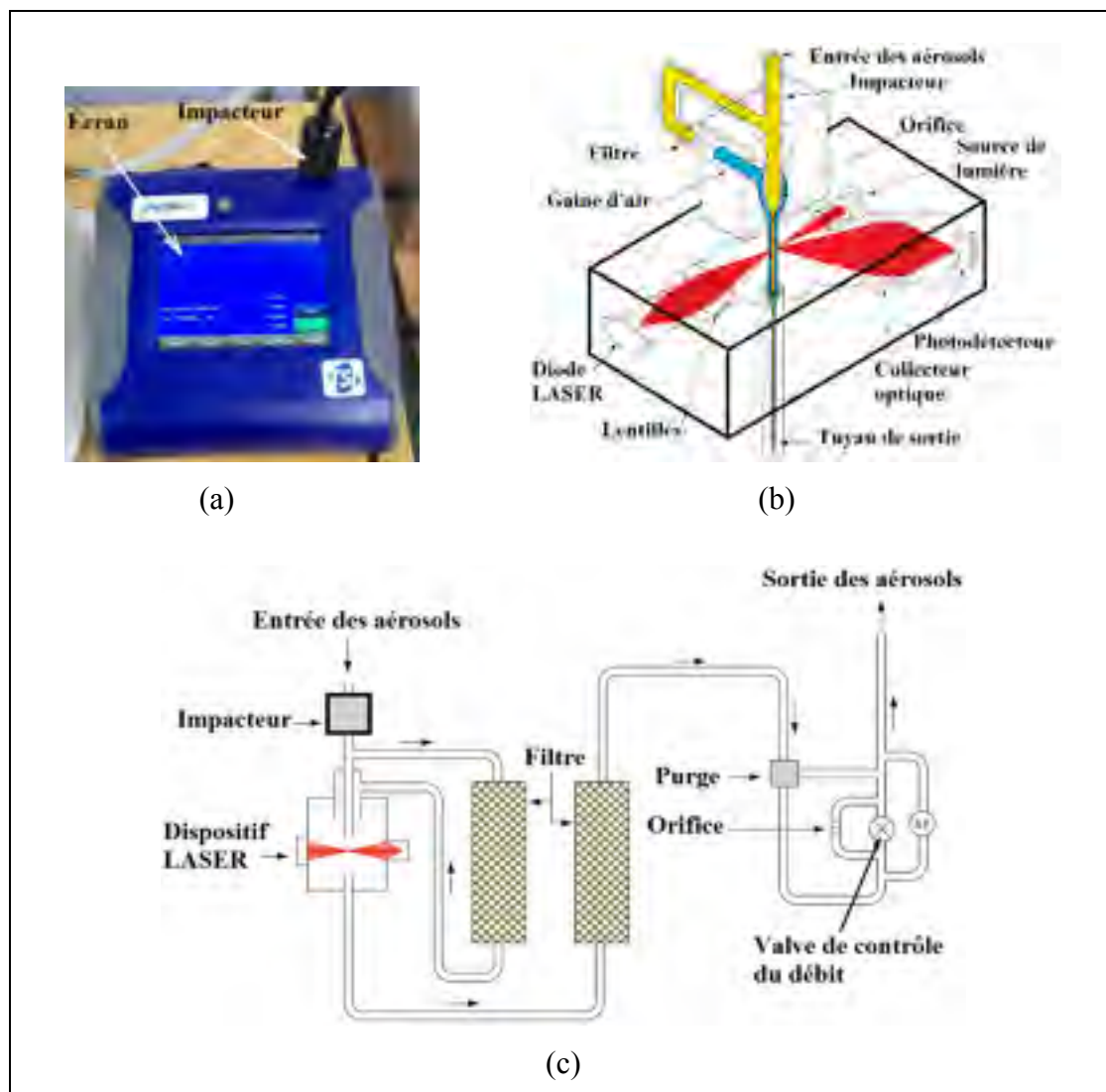


Figure 3.4 DUSTTRAK #8530 : (a) Photo; (b) Dispositif de mesure,
(c) Circuit de l'aérosol
Adaptée de www.tsi.com consulté le 28/02/2014

3.1.1.4 Le diluteur, le débitmètre massique, et la source d'air «propre»

Le diluteur est la petite chambre cylindrique comprenant deux orifices d'entrée (de l'air «propre» et de l'air «pollué»), puis un orifice de sortie permettant d'associer un appareil de mesure des concentrations massiques en poussières (Dusttrak). Le débitmètre massique est celle utilisée dans les essais de dilution des aérosols NaCl.

Il est monté de manière à obtenir des débits précis et répétables sur plusieurs mesurages. La source d'air «propre» est prise à partir d'un dispositif d'air comprimé qui permet d'obtenir les débits et les pressions exploités dans le cadre des essais réalisés sur les aérosols de NaCl. Ces trois appareils sont reliés par des tuyaux flexibles suffisamment courts et droits pour réduire les pertes de particules.

3.1.2 Les méthodes

L'ensemble des méthodes comprennent respectivement dans le choix du type de polissage et de l'abrasif, le choix de la plage de la charge manuelle normale, les plans d'expériences, l'estimation et la modélisation du taux d'émission, la méthode de Simpson d'estimation des poussières totales

3.1.2.1 Méthodes de choix du type de polissage et de l'abrasif

Le polissage linéaire a été adopté en raison de sa simplicité pour l'observation des phénomènes. D'emblée, la littérature permet de distinguer l'abrasion à «deux corps» qui met en contact l'abrasif fixe et la matière, l'abrasion à «trois corps» qui met en contact l'abrasif fixe, l'abrasif libre et la matière. La littérature nous permet d'identifier les facteurs majeurs pris en compte dans les essais de polissage en vue de son estimation. Une fois les facteurs majeurs identifiés, la méthode des plans d'expérience permet de développer un modèle empirique qui sera validé par des essais complémentaires. L'abrasif en alumine sera de grade 60 et utilisé avec une vitesse de coupe constante de 880 m/min (4200 RPM). Le choix de ce grade d'abrasif est largement justifié par des essais qui ont montré qu'il générerait le plus de poussières en masse et en nombre.

3.1.2.2 Méthodes de choix de la plage de la charge manuelle normale

Le choix des charges normales et manuelles s'est inspiré de la littérature portant sur la force musculaire susceptible d'être exercé par un ouvrier en situation de travail de la pierre. Binet et Vachilde (1897), Piette et al (1995), Chalfoun (2005) ont utilisé des méthodes expérimentales pour déterminer la force musculaire de pression que peut exercer un ouvrier au cours d'une opération. Ces auteurs situent les efforts musculaires entre 30 et 100 N pour un ouvrier normal en bonne santé physique. Le choix retenu est de 46N, 51N, 56N et 61N.

3.1.2.3 Méthodes des plans d'expériences

Cette méthode permettra d'étudier à la fois l'émission et la dilution des poussières de polissage pour deux nuances de granites ayant des proportions en silice différentes (le granite «blanc» avec 60% de Si et le granite «noir» avec 10% de Si). Le facteur principal à prendre en compte dans le cadre de l'étude de l'émission est essentiellement la force normale exercée sur l'abrasif au cours du polissage. Il s'agira d'observer expérimentalement l'influence de la charge normale appliquée (46, 51, 56 et 61 N), de la nuance de granites («blanc» ou «noir»), et du système de dilution (sans dilution et avec dilution) sur les concentrations de poussières générées et par conséquent sur les poussières totales ou le taux d'émission qui sont des paramètres exploitables pour une étude ultérieure de dispersion des poussières dans l'air ambiant (Figure 3.5).

Les essais seront planifiés de manière à assurer la répétabilité de la réponse observée (concentration en poussières) dans les deux situations d'échantillonnage (avec dilution ou sans dilution de poussières). Pour chaque charge appliquée sur la zone délimitée sur la surface de l'échantillon de granite, les poussières seront collectées pendant cinq minutes pour une durée de polissage d'une minute. Un plan complet de 16 essais a été réalisé pour observer l'influence de la charge normale, de la nuance de granite et du type d'échantillonnage sur la concentration massique (mg/m^3) et sur le taux d'émission dans les mêmes conditions de polissage. Globalement le but du plan d'expérience est de trouver une fonction empirique qui relie le taux d'émission en fonction de la charge normale F_z , et de la nuance de granite. Les situations d'échantillonnage sans dilution et avec dilution permettront de contrôler la stabilité du facteur de dilution dans un échantillonnage.

3.1.2.4 Méthodes d'estimation et de modélisation du taux d'émission

La méthode d'estimation du taux d'émission des PM_{2.5} est basée sur le principe de «conservation de la matière enlevée» au cours du frottement de l'abrasif et l'échantillon de granite (Figure 3.6). L'hypothèse de modélisation est basée sur le fait que toute la matière enlevée au polissage est supposée être intégralement émises dans l'air ambiant de la boîte de rétention sous la forme des poussières PM_{2.5}.

Yilmaz et al, (2013) montre dans ses travaux que le polissage du granite produit des copeaux qui selon le grade de l'abrasif peut être généré sous formes de micro-copeaux ou de poussières. Au cours du polissage du granite, les micro-copeaux peuvent se sédimenter sous l'effet de la gravité ou demeurer dans l'air ambiant sous forme de particules en suspension jusqu'à leur dépôt. En supposant le grain abrasif d'une dureté très élevée pour ne permettre aucune usure, nous définissons le taux d'émission des granites au polissage comme le rapport de la perte massique de matière susceptible d'être échantillonné dans l'air ambiant divisé par le temps de polissage.

La méthodologie d'estimation du taux d'émission basé sur le modèle de la figure 3.6, est formulée par l'équation 3.1:

$$\xi_v = \frac{m_{2.5}}{\Delta t} = \frac{\Delta m - m_s - m_{\text{non}2.5}}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Où $m_{2.5}$ est la masse de poussières PM2.5 (en kg), Δm est la différence de masse avant et après polissage (en kg), m_s : la masse de micro-copeaux sédimentés (en kg), $m_{\text{non}2.5}$ est la masse de poussières dont le diamètre aérodynamique est supérieur à $2.5 \mu\text{m}$ et qui n'ont pas été échantillonnés par l'impacteur 2.5 (en kg), Δt est le temps de polissage (en seconde). Le numérateur du taux d'émission est la différence entre la masse de matière totale enlevée (Δm), la masse de matière déposée par sédimentation ou copeaux (m_s) et la masse de poussières non PM2.5 enlevée par l'impacteur.

3.1.2.5 Méthode de Simpson d'estimation des poussières totales

La méthode de Simpson appliquée à l'équation 3.2 nous permettra de déterminer la quantité de poussières totales P_T émises par chaque nuance de granite (Khettabi et al, (2007) :

$$C_T = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{i+1} + C_i}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (3.2)$$

C_T : Poussière totale en mg/m^3 ; C_i : Concentration en mg/m^3 prélevée à la date t_i ; C_{i-1} : Concentration en mg/m^3 prélevée à la date t_{i-1} .

3.1.2.6 Méthode d'estimation du taux d'émission au polissage linéaire

La méthodologie générale de modélisation du taux d'émission des granites est détaillée dans l'organigramme de la figure 3.7. Elle montre clairement les méthodes et les outils utilisés dans le cadre de cette recherche pour prédire le taux d'émission en poussières des granites au cours du polissage linéaire.

Le taux d'émission sera calculé par l'équation 3.3 :

$$\xi_v = \left(\sum_{i=0}^{299} \left[\frac{C_{i+1} + C_i}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] \right) \cdot \frac{Q}{3600 t_u} \quad (3.3)$$

Q est le débit du photomètre DUSTTRAK : 1.5 l/min; t_u est le temps de polissage est 1 min; C_i : concentration instantanée en mg/m³, i : l'instant de l'échantillon d'air pollué, ξ_v est le taux d'émission en µg/s.

3.2 Présentation des principaux résultats obtenus

Ces résultats concernent les concentrations temporelles de poussières avant et après la dilution où le fonctionnement du photomètre sera abordé en corrélation avec la dilution de poussières. Ensuite les poussières «totales» seront estimées pour comparer les deux matériaux sur le plan de l'émissivité. Puis, le facteur de dilution «concentration» sera évalué pour valider son comportement stable au cours des essais réalisés. Les forces de polissage permettent de corréler l'intensité de la charge normale sur les poussières «totales». Le taux d'émission des poussières de granite est par la suite évalué pour fournir des indications utiles aux professionnels de la dispersion qui peuvent l'exploiter dans la modélisation. Les modèles de régression du taux d'émission de poussières sont développés pour prédire l'émission des poussières au cours du polissage des granites en utilisant un facteur de dilution expérimental fourni à l'avance. Le coefficient d'émissivité spécifique en poussières est un concept nouveau permettant de comparer le niveau d'émissivité des matériaux.

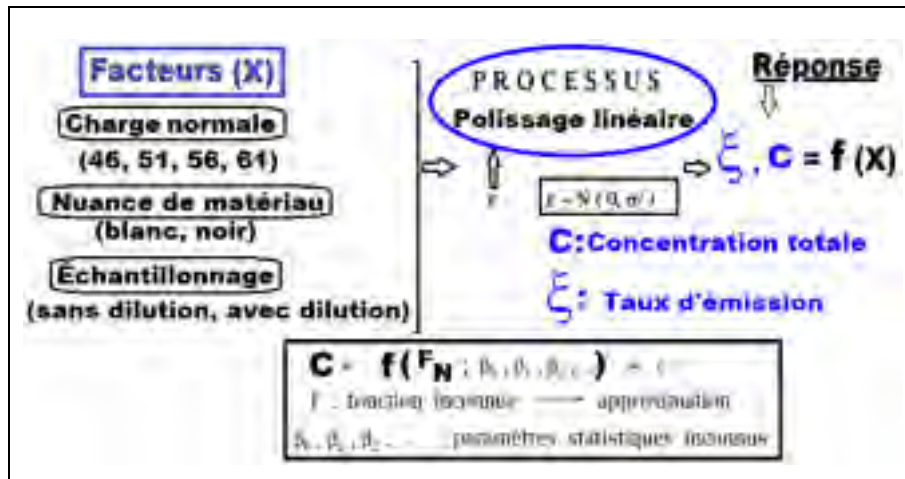


Figure 3.5 Processus des plans d'expériences pour les essais de polissage

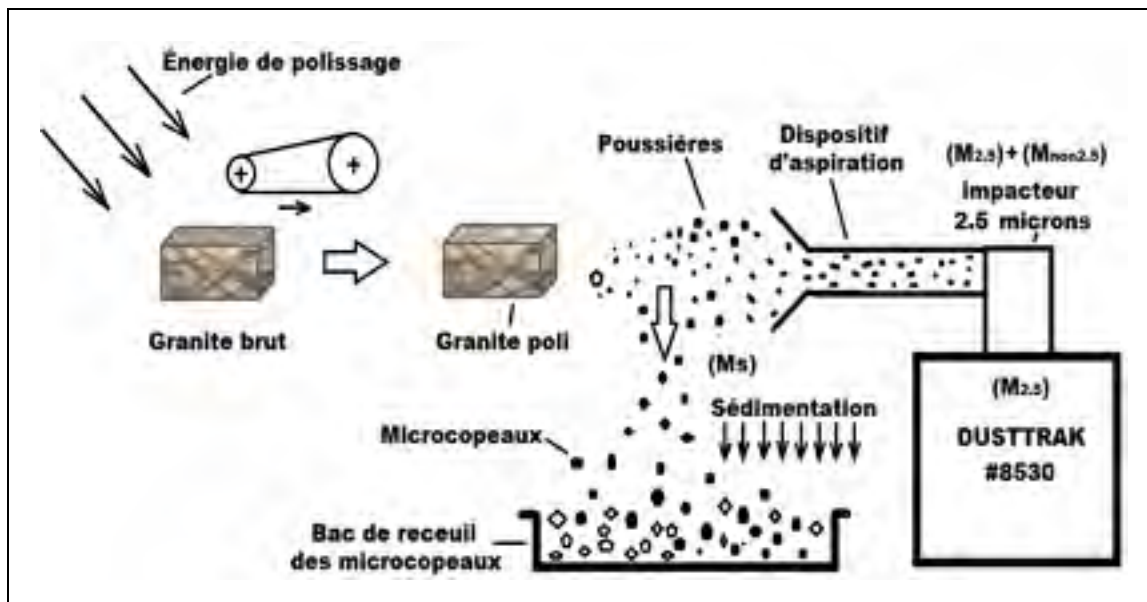


Figure 3.6 Processus d'estimation du taux d'émission de PM2.5 au polissage linéaire

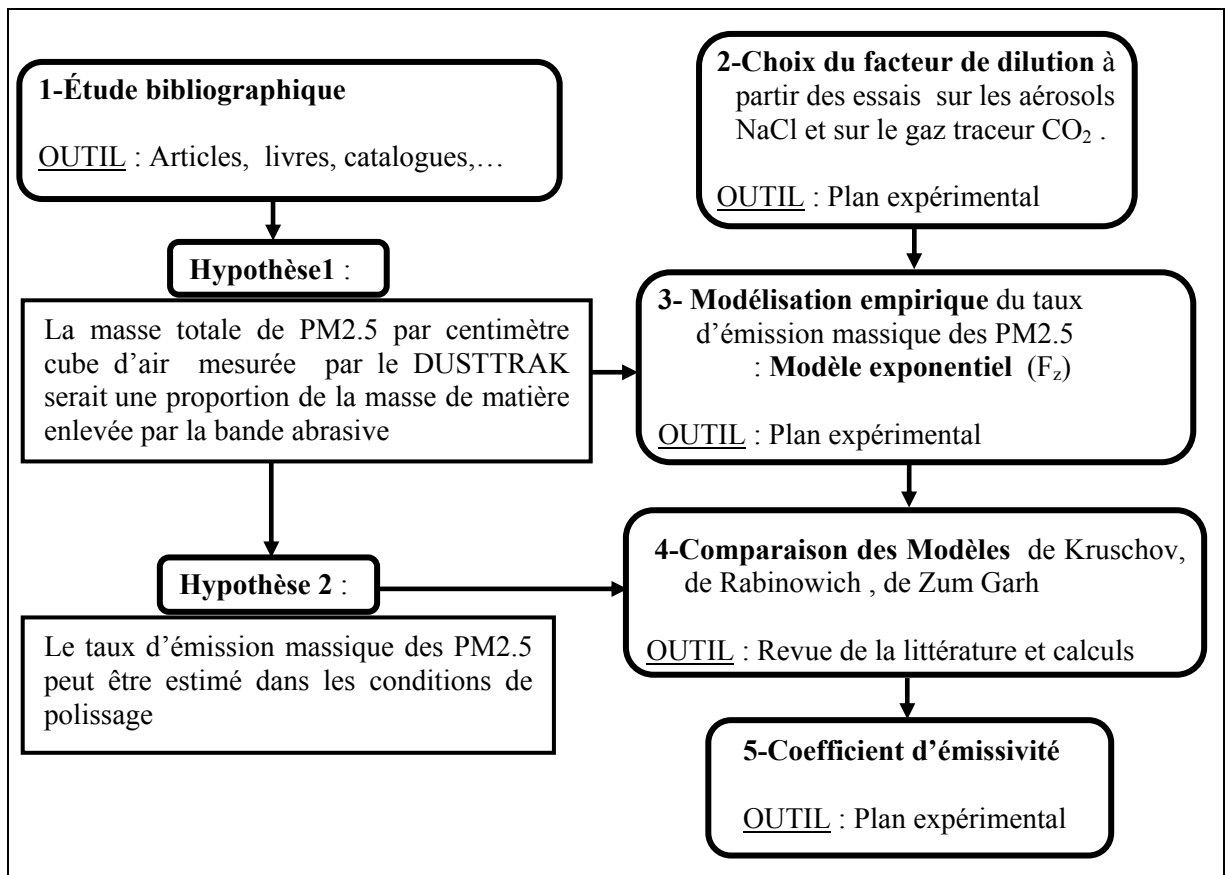


Figure 3.7 Méthodologie de modélisation du taux d'émission de PM2.5 au polissage linéaire

3.2.1 Comportement des concentrations temporelles au cours du polissage

Cette section présente les concentrations temporelles des poussières de granite obtenues respectivement avant et après dilution. L'observation de ce spectre nous permet de décrire l'influence de la dilution sur le mesurage.

3.2.1.1 Comportement temporel des concentrations de poussières au polissage linéaire des granites «noir» et «blanc» avant la dilution

Les concentrations temporelles observées au cours des essais sans dilution montrent qu'en moyenne entre la 64^{ème} seconde et la 164^{ème} seconde, elles sont au-dessus de la concentration ambiante du photomètre DUSTTRAK (0.004 mg/m³).

Cela signifie qu'au cours de la durée de polissage (fixée à une minute), le maximum de poussières émises par l'opération de polissage linéaire est collecté par l'instrument de mesure des concentrations massiques en poussières. Les charges appliquées ont une influence significative sur la concentration temporelle. En réalité, si nous prenons le cas où la charge est de 46N pour le granite «noir» (Figure 3.8a), nous observons bien qu'au moment où la bande abrasive entre en contact avec l'échantillon de granite, la concentration temporelle croît rapidement en deux secondes jusqu'à atteindre un maximum, puis décroît rapidement en dix secondes pour atteindre une légère stabilisation pendant tout le reste de la durée de polissage.

Ainsi, lorsque la bande abrasive quitte la surface de l'échantillon de granite, la concentration temporelle baisse jusqu'à atteindre la concentration ambiante. Par contre, le comportement des poussières de granite «blanc» est différent dans les mêmes conditions de polissage. La figure 3.8b nous montre que le contact entre la bande abrasive et l'échantillon de granite «blanc» se traduit aussi par une élévation rapide de la concentration temporelle qui atteint un maximum, puis il y a la présence d'une pseudo-stabilisation durant tout le reste de la durée de polissage. Lorsque la bande abrasive quitte la surface de l'échantillon, la concentration temporelle décroît rapidement en deux secondes pour atteindre la concentration ambiante. Ces deux comportements sont observés pour les autres charges normales respectivement pour le granite «noir» et le granite «blanc» (Figures 3.9a, b; 3.10a, b; 3.11a, b).

Par ailleurs, dans les cas du granite «noir» sous les charges normales de 51 et 56 N et du granite «blanc» sous toutes les charges, le maximum de concentration temporelle est supérieur à la limite de lecture des concentrations fixée par le manufacturier TSI (400 mg/m³). Ce qui démontre une défaillance du système de mesurage du photomètre DUSTTRAK dans les conditions de très fortes concentrations en poussières. Cette situation justifie à plus d'un titre la nécessité de la dilution pour protéger chaîne de mesure des appareils de la qualité de l'air. Cette dilution a été appliquée aux concentrations obtenues directement du procédé de polissage. Un facteur de dilution théorique de 5 a été utilisé avec un débit d'air «pollué» de 0.25 LPM et un débit d'air «propre» de 1 LPM. Elle aura permis d'abaisser les concentrations au-dessous de 25% de la limite de lecture du DUSTTRAK.

La dilution des poussières de granite «noir» permet d'observer des concentrations temporelles maximales de l'ordre de 40 mg/m^3 alors que celle du granite «blanc» se situent autour de 60 mg/m^3 (Figure 3.12a, b; 3.13a, b; 3.14a, b). Le facteur de dilution expérimental calculé à partir des concentrations massiques fournies par le photomètre Dusttrak TSI #8530, permet une comparaison avec le facteur de dilution prédite de 5 (Figure 3.15a, b). Les résultats expérimentaux et les résultats théoriques son relativement proche. Ce qui nous permet de conclure que les modèles obtenus avec les aérosols de NaCl peuvent être applicables aux aérosols de granite. Les résultats du facteur de dilution obtenus pour le granite «noir» ont mieux convergé que ceux du granite «blanc». Aucune explication n'a été trouvée pour expliquer ce phénomène. Toutefois nous pouvons attribuer cette situation à la granulométrie de la population des aérosols du PM_{2.5}.

3.2.1.2 Comportement des concentrations temporelles calculées à partir du facteur de dilution moyen au polissage linéaire des granites «noir» et «blanc»

Une étude comparative des concentrations temporelles calculées à partir du facteur de dilution (DF) et les concentrations temporelles brutes obtenues sans dilution, montre que pour le granite noir à 51 et 56 N les spectres ne sont confondus que pour une durée courte. Les deux types de concentrations commencent à se différencier relativement lorsqu'elles sont dans leur phase de croissance jusqu'à atteindre leur maximum. Au-delà de leur maximum, les deux types de concentrations se diffèrent nettement, mais ont les mêmes tendances à décroître jusqu'à leur minimum. Cette différenciation des concentrations est encore plus prononcée lorsque la charge passe de 51 à 56 N (Figure 3.15a, b). Par contre pour le granite «blanc», bien que la tendance soit à conserver l'allure du spectre pour la charge de 46N, les autres charges présentent des comportements similaires à ceux du granite «noir» avec une importante marge entre les deux types de concentration (Figure 3.16a, b; 3.17a, b; 3.18a, b). L'interprétation donnée à ces deux types de comportement est la suivante : lorsque les concentrations temporelles évoluent jusqu'à dépasser la limite de lecture, le photomètre DUSTTRAK perd d'importantes informations sur les valeurs réelles des concentrations. En conséquence, la dilution permet de recouvrir cette partie du spectre qui a été perdu du fait de la limite du calibre de l'appareil de mesure.

À ce titre, la différence des surfaces en dessous des courbes permet d'estimer l'erreur commise si l'on utilise les valeurs des concentrations sans dilution. Une observation minutieuse des graphiques de concentrations temporelles permet de conclure que dans les mêmes conditions de polissage, le matériau de granite «blanc» émet dans l'air ambiant plus de poussières que le matériau de granite «noir». L'estimation des poussières totales permettra de comparer la capacité des deux nuances de granite à générer les poussières au cours du polissage. L'observation et l'estimation de la surface en dessous de la courbe expérimentale de la concentration temporelle montrent que celle du granite «blanc» est largement supérieure à celle du granite «noir». Ce qui pourrait nous amener à conclure que le polissage du granite «blanc» génère plus de poussières que celui granite «noir». Ce phénomène sera validé pour les deux nuances de granite.

3.2.2 Analyse du processus d'émission de poussières de granites

Dans les mêmes conditions de polissage, les poussières totales se comportent différemment pour les deux granites sous l'influence de la charge normale (Figure 3.19a, b). Les poussières totales émises par le polissage du granite «blanc» est largement supérieure à celle du granite «noir» dans la même durée de coupe et quel que soit les situations d'échantillonnage (sans dilution, avec dilution). Ces concentrations ne dépassent pas 20000 mg/m^3 pour une durée de polissage constant de 300s et une vitesse de coupe constante de 880 m/min. Pour les deux matériaux, le spectre des concentrations est plus continu avec des concentrations successives relativement proches.

Au cours du polissage, la dilution améliore davantage le fonctionnement du DUSTTRAK qui par sa nature procède par un mesurage des concentrations par «à coup». Les concentrations temporelles observées pour les deux granites dans les conditions de dilution démontrent qu'elles sont progressives tout en conservant la tendance habituelle du spectre. L'interprétation des émissions sera abordée en deux volets notamment la microstructure des deux nuances de granites et la manifestation des mécanismes de génération des poussières.

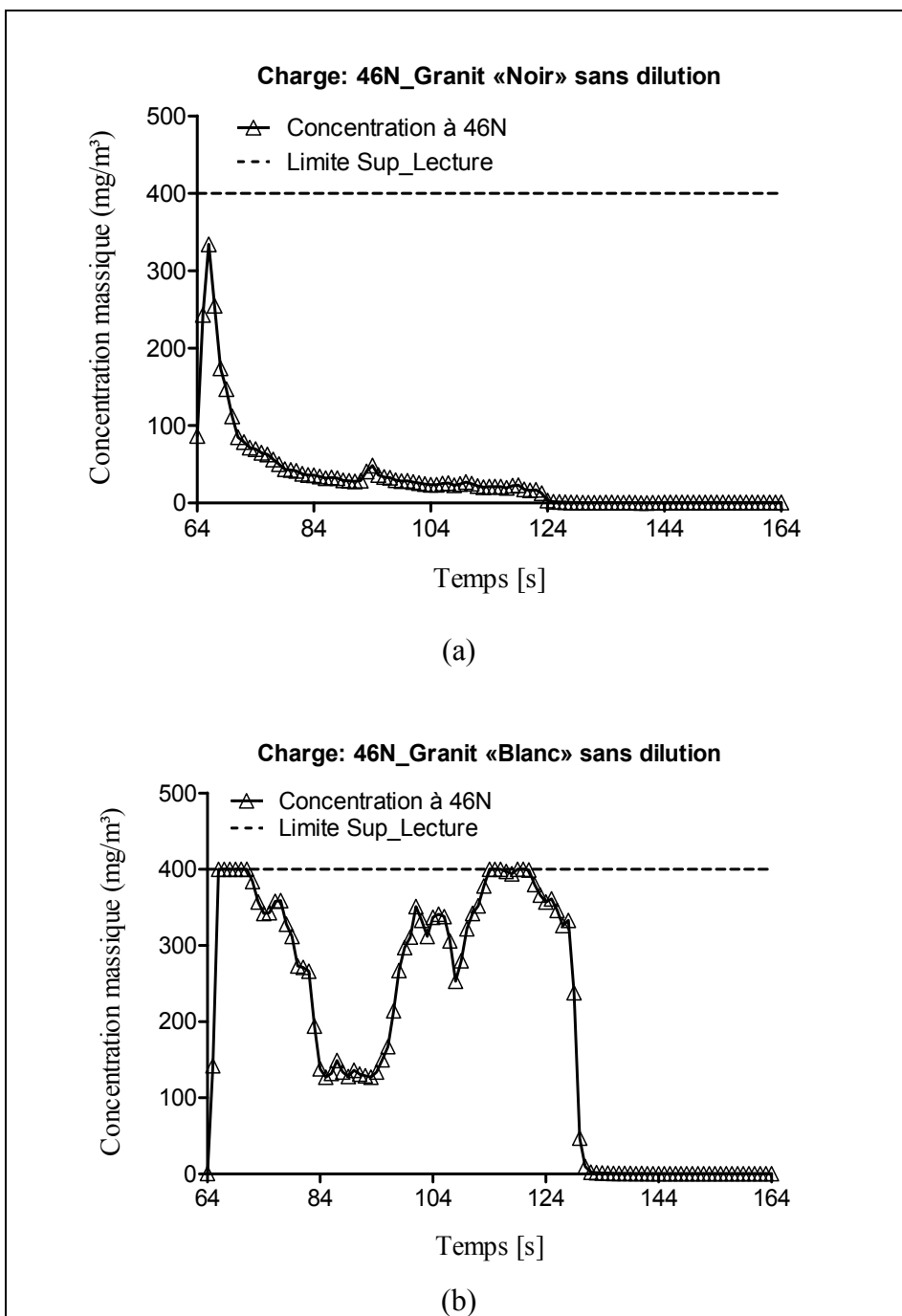


Figure 3.8 Concentrations temporelles à 46 N: (a) granite «noir», (b) granite «blanc»

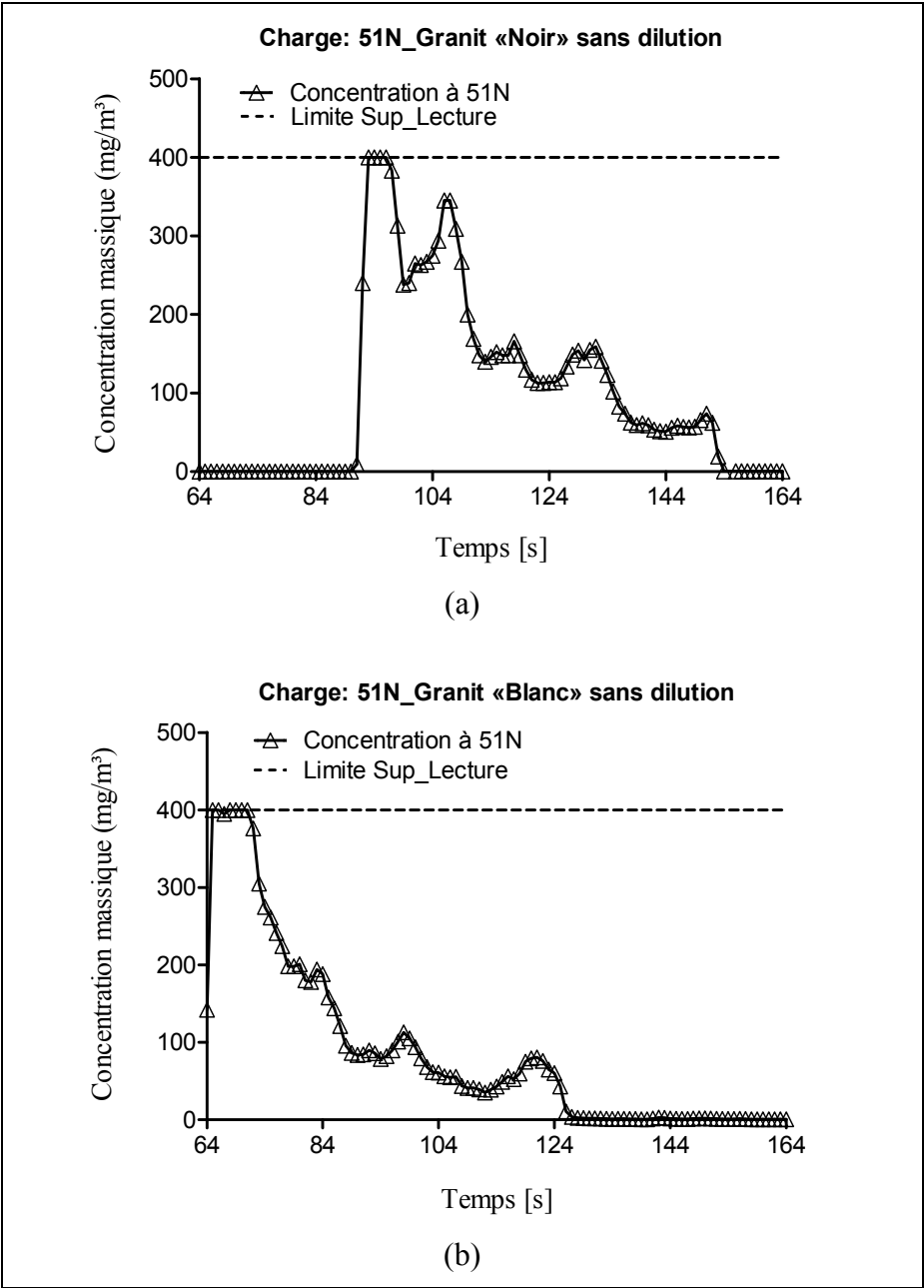


Figure 3.9 Concentrations temporelles à 51 N: (a) granite «noir»,
(b) granite «blanc»

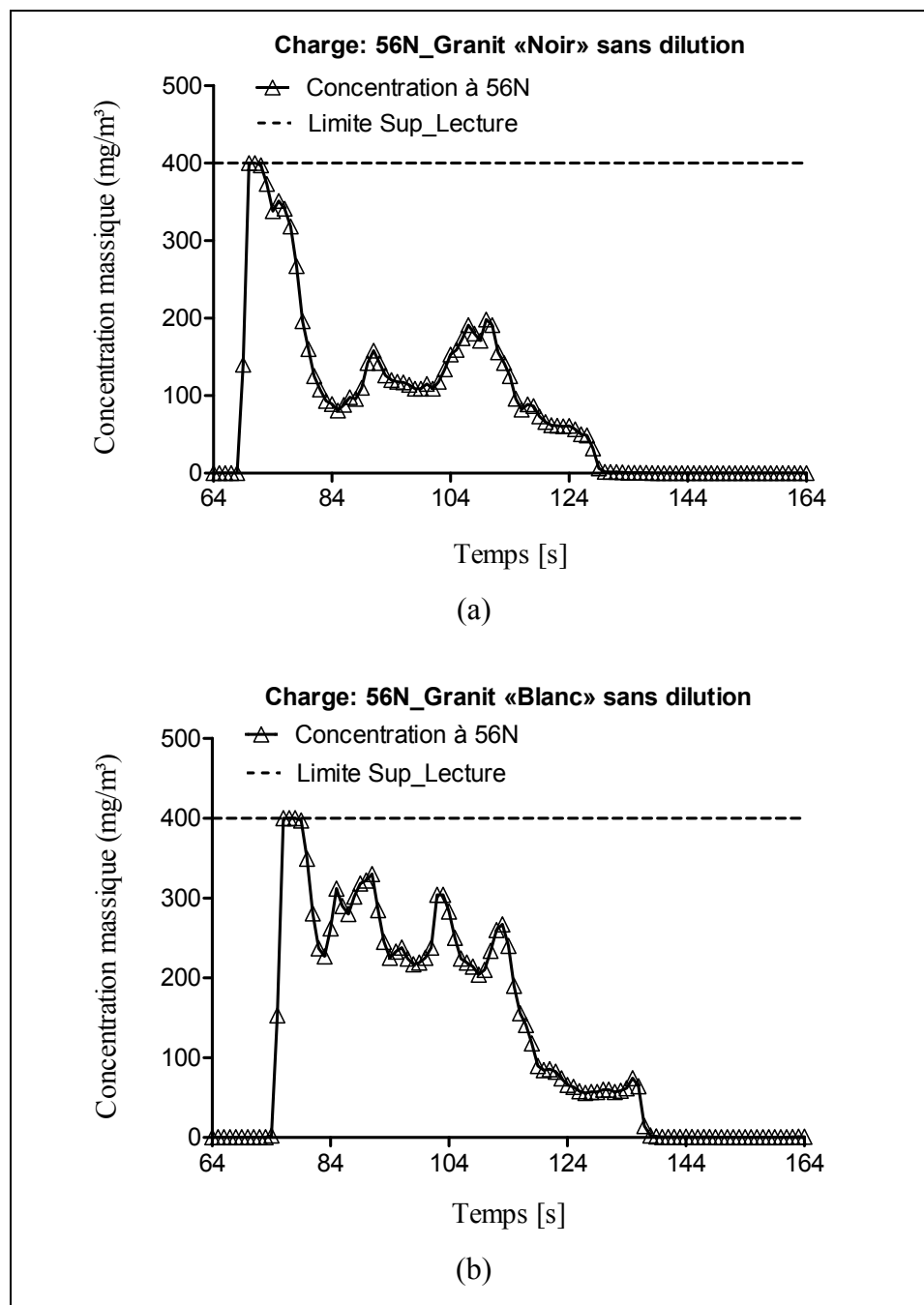


Figure 3.10 Concentrations temporelles à 56 N: (a) granite «noir»,
(b) granite «blanc»

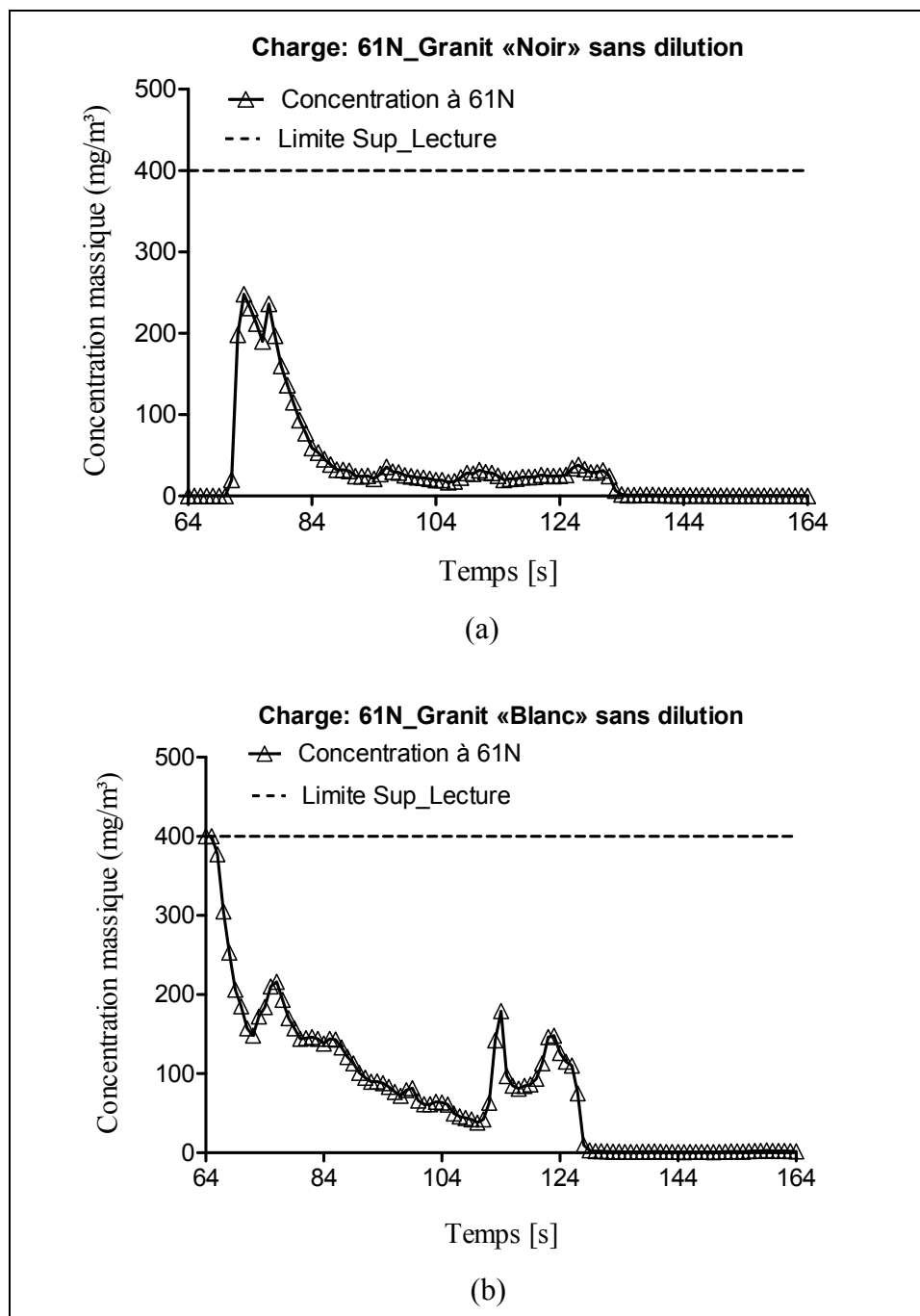


Figure 3.11 Concentrations temporelles à 61 N: (a) granite «noir»,
(b) granite «blanc»

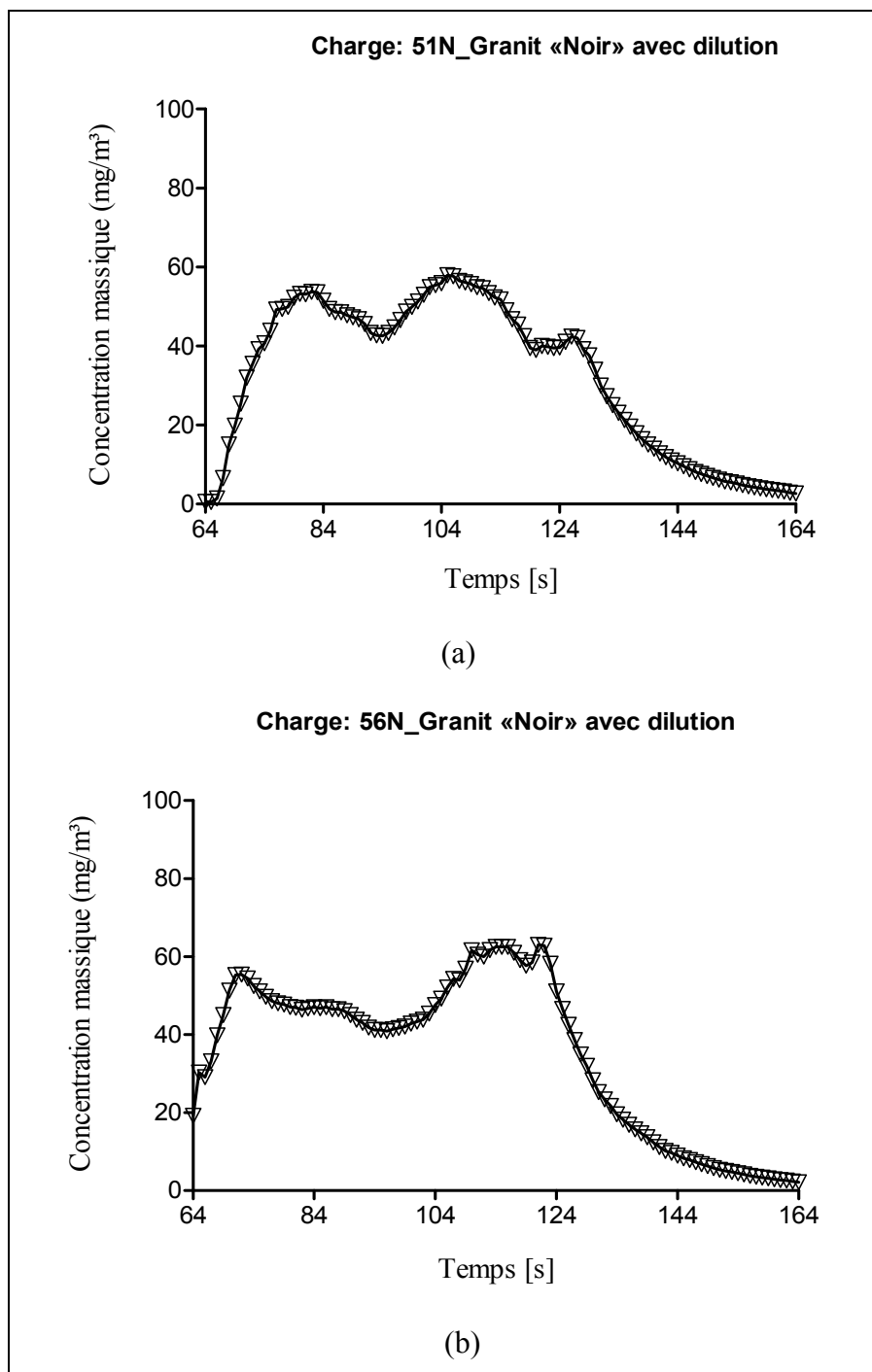


Figure 3.12 Concentrations temporelles avec dilution pour le granite «noir» sous les charges normales : (a) 51N; (b) 56N

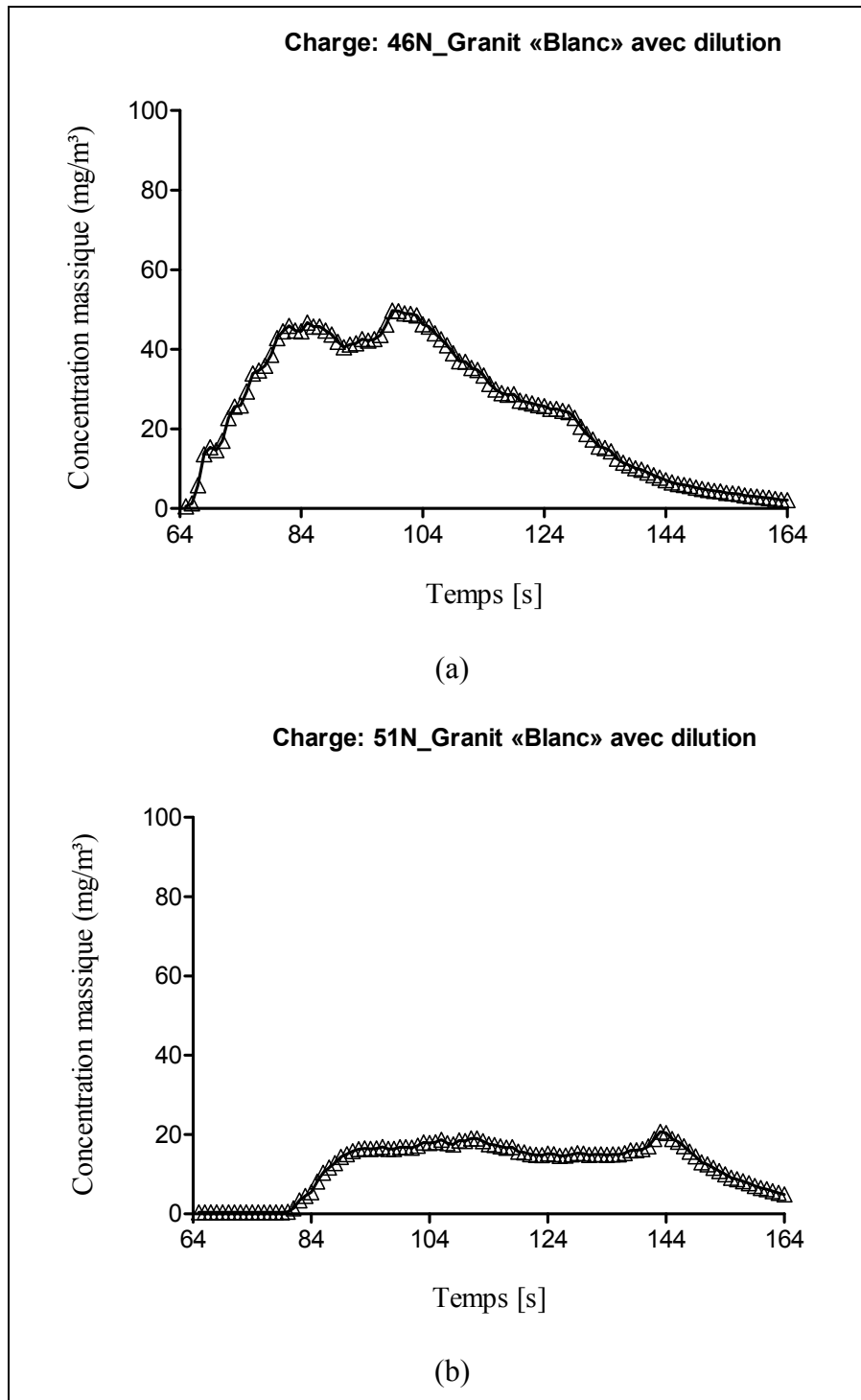


Figure 3.13 Concentrations temporelles avec dilution pour le granite «blanc» sous les charges normales : (a) 46N; (b) 51N

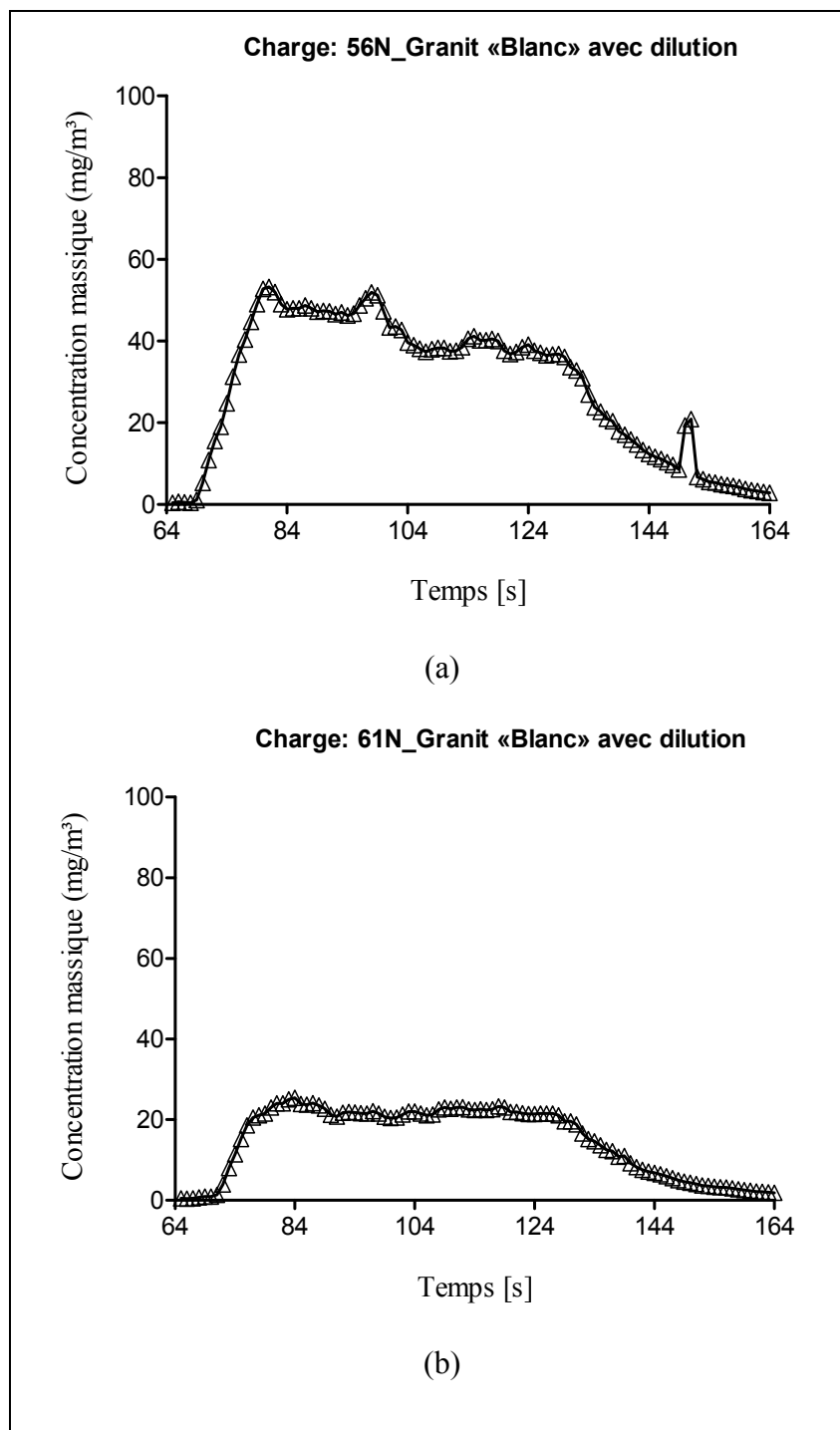


Figure 3.14 Concentrations temporelles avec dilution pour le granite «blanc» sous les charges normales : (a) 56N; (b) 61N

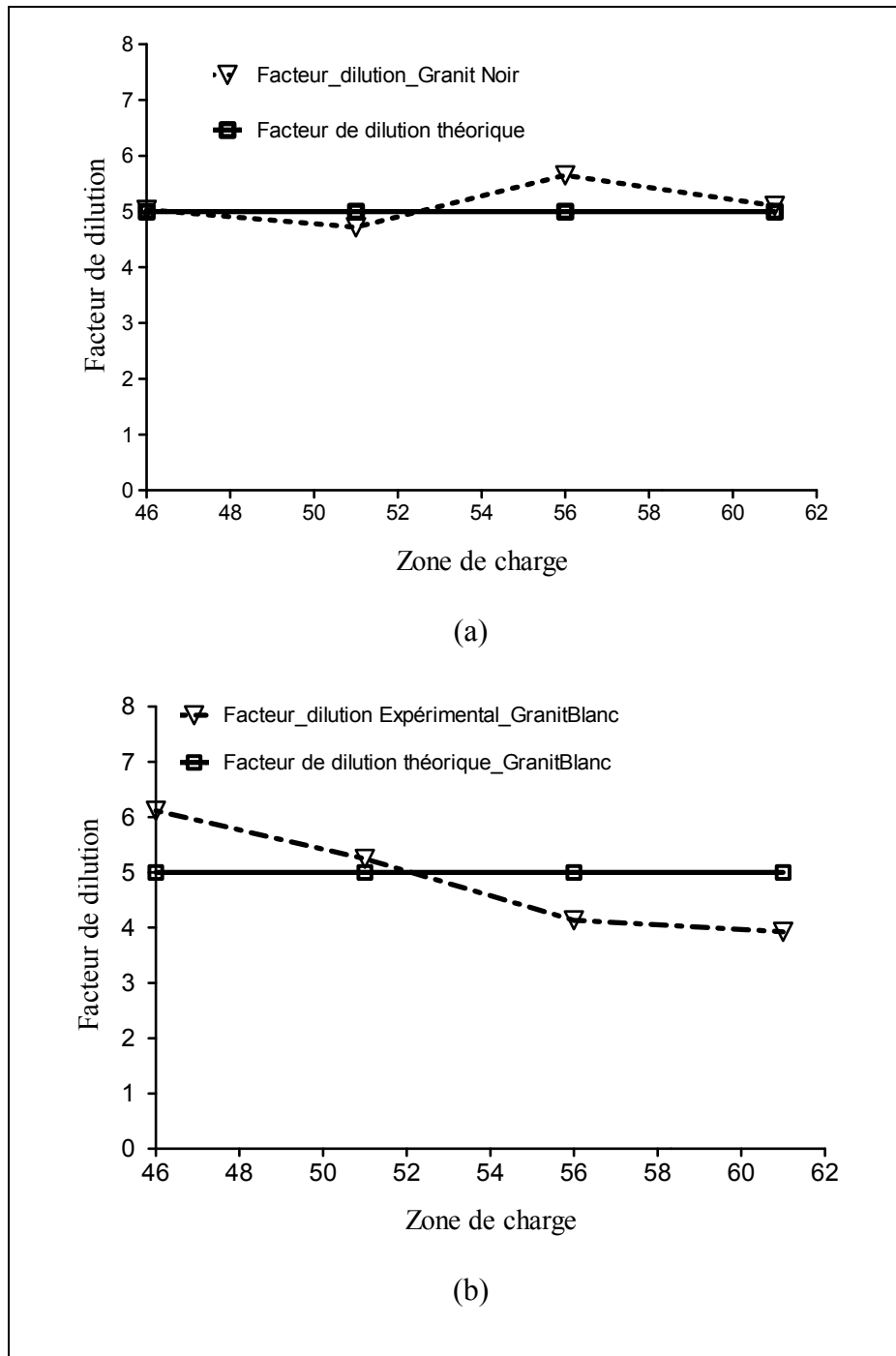


Figure 3.15 Graphiques du facteur de dilution
au cours des essais sur : (a) Granite «noir»,
(b) Granite «blanc»

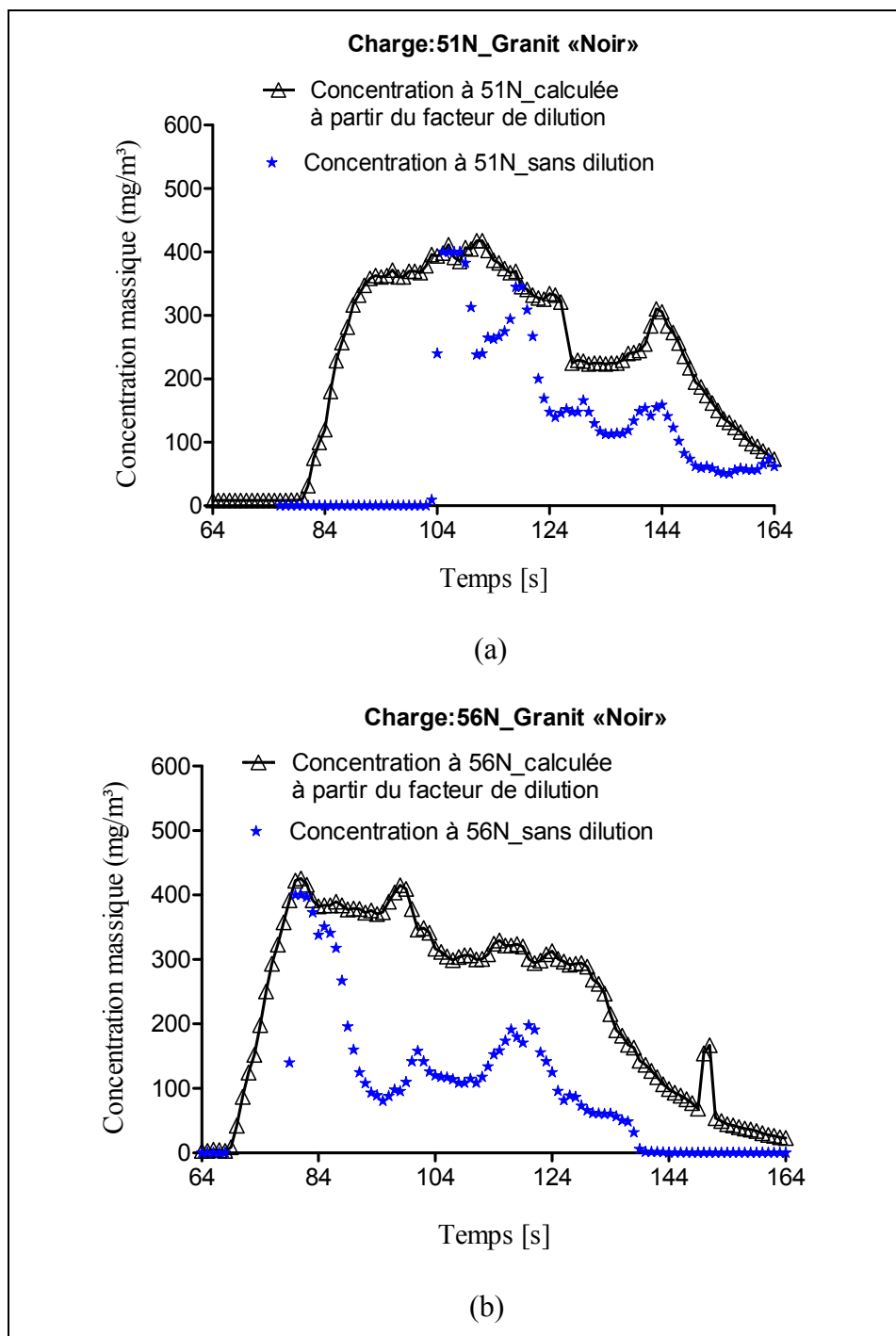


Figure 3.16 Concentrations temporelles brutes et celles calculées à partir du facteur de dilution de 5 pour le granite «noir» : (a) Charge de 51 N, (b) Charge de 56 N

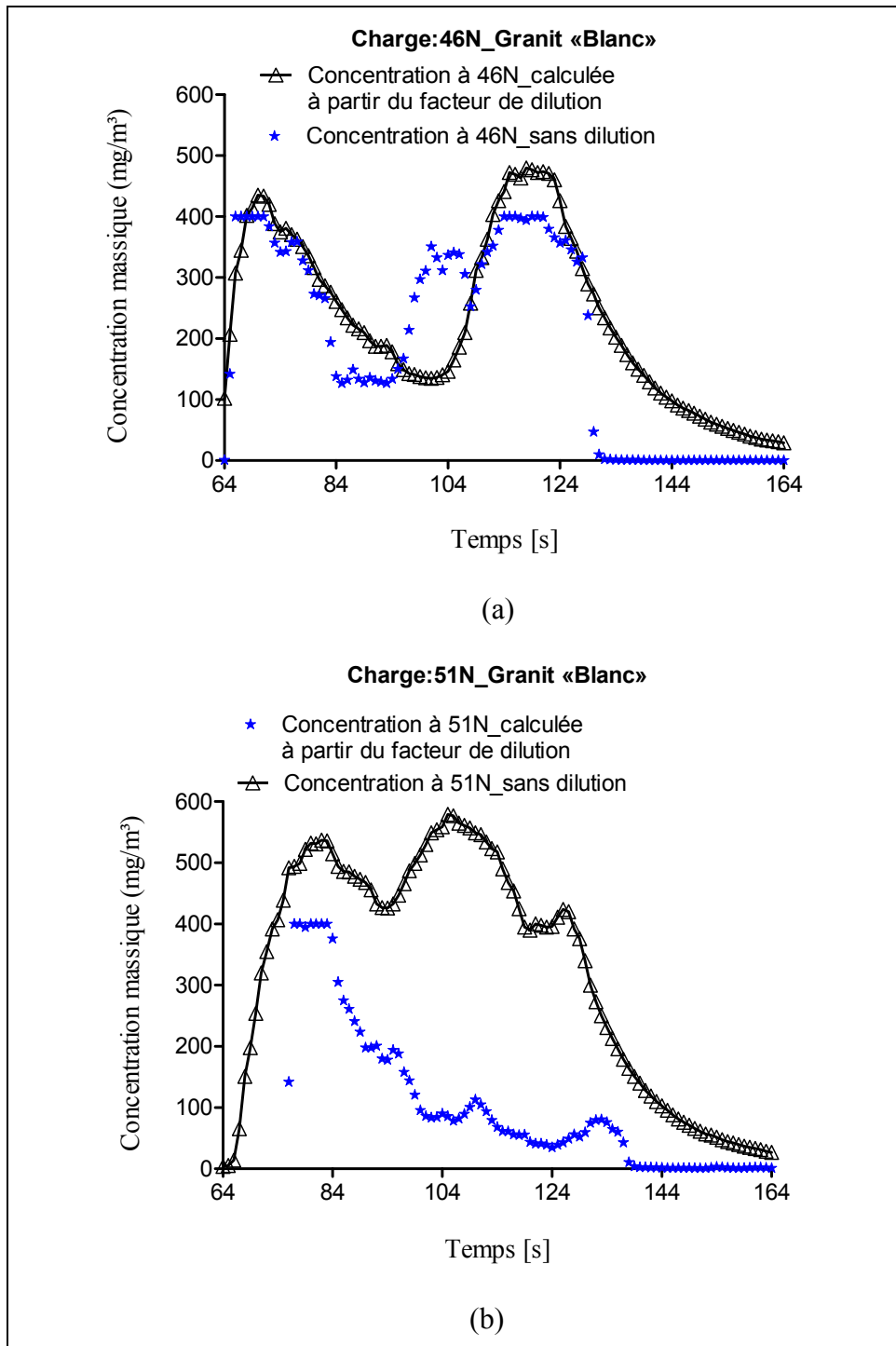


Figure 3.17 Concentrations temporelles brutes et celles calculées à partir du facteur de dilution de 5 pour le granite «blanc» : (a) Charge de 46 N, (b) Charge de 51 N

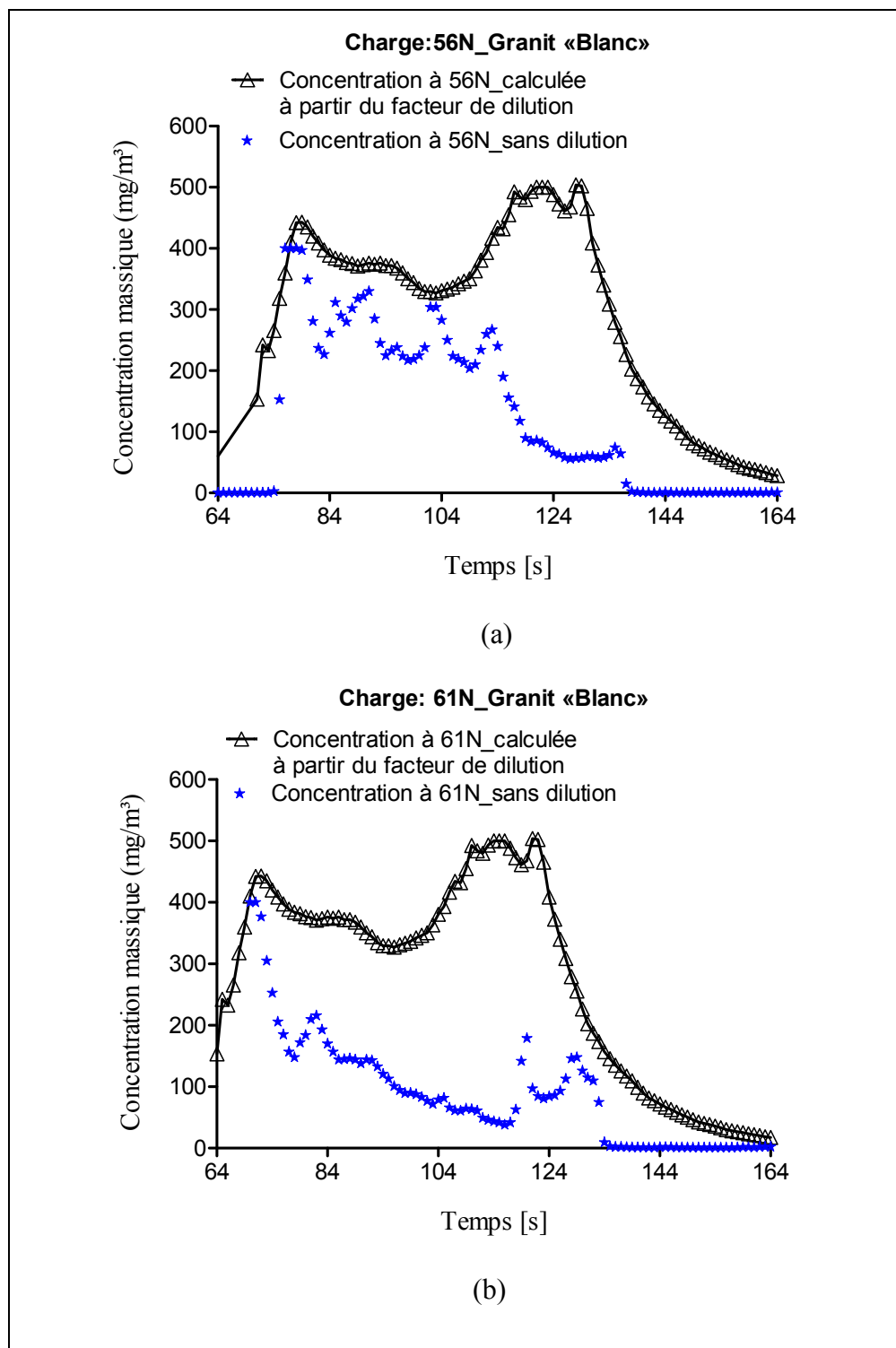


Figure 3.18 Concentrations temporelles brutes et celles calculées à partir du facteur de dilution de 5 pour le granite «blanc» : (a) Charge de 56 N, (b) Charge de 61 N

3.2.2.1 L'influence de la microstructure des granites et des forces de coupe sur l'émission des poussières

La microstructure des deux nuances de granites influencerait le comportement des spectres de concentration temporelle des granites noir et blanc. En effet, l'observation de la texture du granite «blanc» montre qu'elle est constituée de gros grains par rapport au granite «noir». Par ailleurs sa couleur blanche montre une forte proportion de feldspath ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8$)Ca jouant le rôle de liant entre la quartz et le mica. La caractéristique du feldspath est qu'elle s'effrite facilement au contact, ce qui pourrait expliquer une forte émission de poussières de granite. Par contre, le granite «noir» contient du pyroxène de couleur noir $(\text{Mg}, \text{Fe})_7(\text{SiO}_3)_2$ qui s'incruste dans le feldspath en faible proportion pour donner à ce type de granite une très grande résistance à l'abrasion par le frottement des meules. La présence du pyroxène expliquerait en grande partie ces comportements différents des deux nuances de granites. Mais des études approfondies pourraient permettre d'établir une corrélation entre la structure des grains et l'émission des poussières de polissage. Les forces de coupe sont également à l'origine de la rupture des crêtes d'aspérités et de l'élévation de température. Au cours des essais, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel F_t (relation linéaire : l'effort double environ quand la vitesse d'avance double). Sur le plan théorique, la force de coupe dépend de l'avance par tour V_w , de la profondeur de passe a_p , et de la pression spécifique de coupe K_c . Elle est indépendante de la vitesse de coupe dès que la vitesse est suffisante pour enlever la matière. Ce phénomène provoque une variation des poussières totales selon l'intensité des forces de polissage dans les trois directions de l'espace. Une synthèse des résultats montre que les forces de coupe ont une influence considérable sur la génération des poussières (Figure 3.20a, b). Plus la charge normale augmente plus les concentrations de poussières diminue. L'explication de ce phénomène est liée au comportement des aspérités de surfaces au moment de la pression normale. Ces aspérités ont tendance à subir une compression qui fait exploser par choc et frottement simultanés les crêtes de ceux-ci. Ainsi une partie de la matière enlevée s'incrusterait dans les interstices des abrasifs.

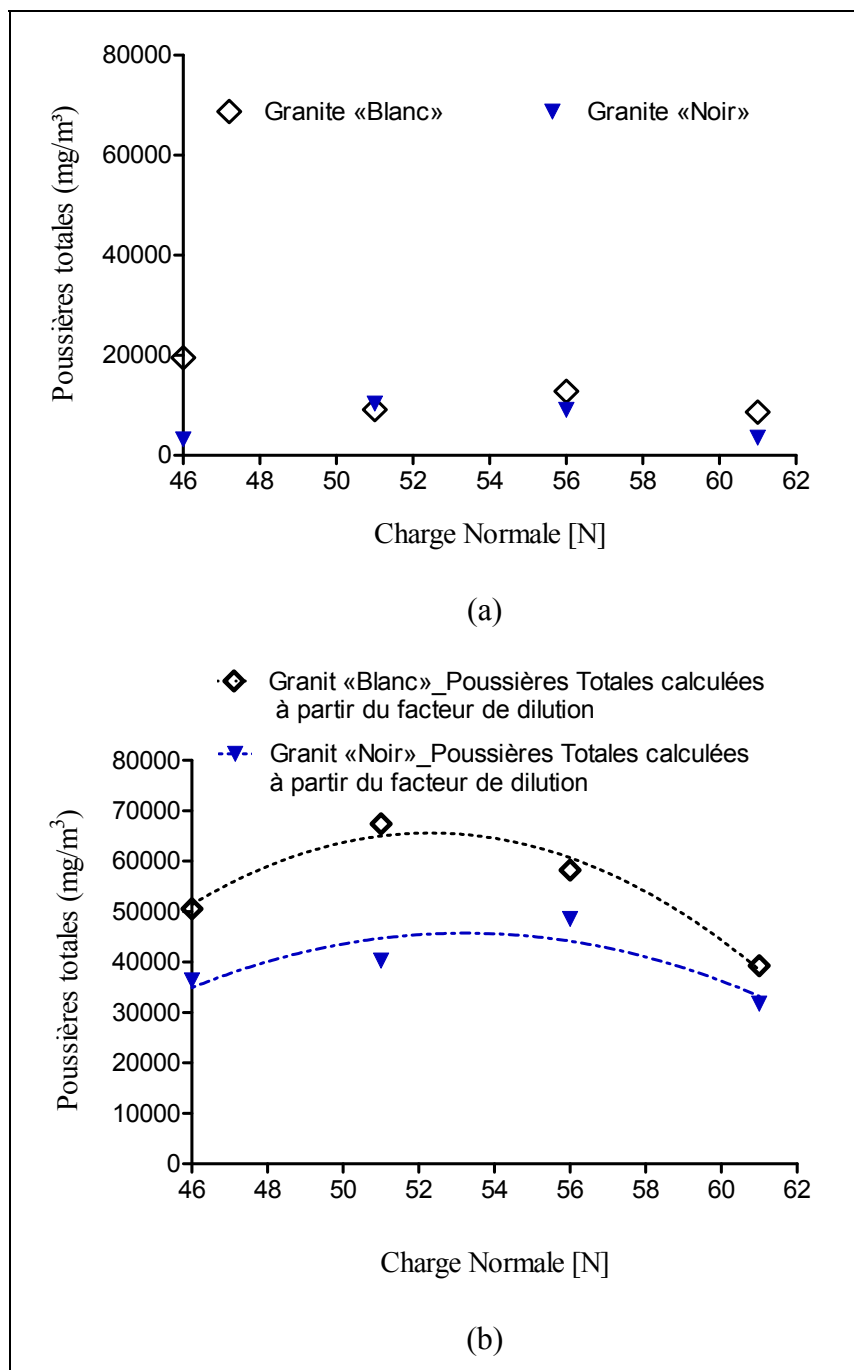


Figure 3.19 Graphiques de poussières totales en fonction de la charge au polissage linéaire du granite :
(a) brutes, (b) calculées à partir du DF

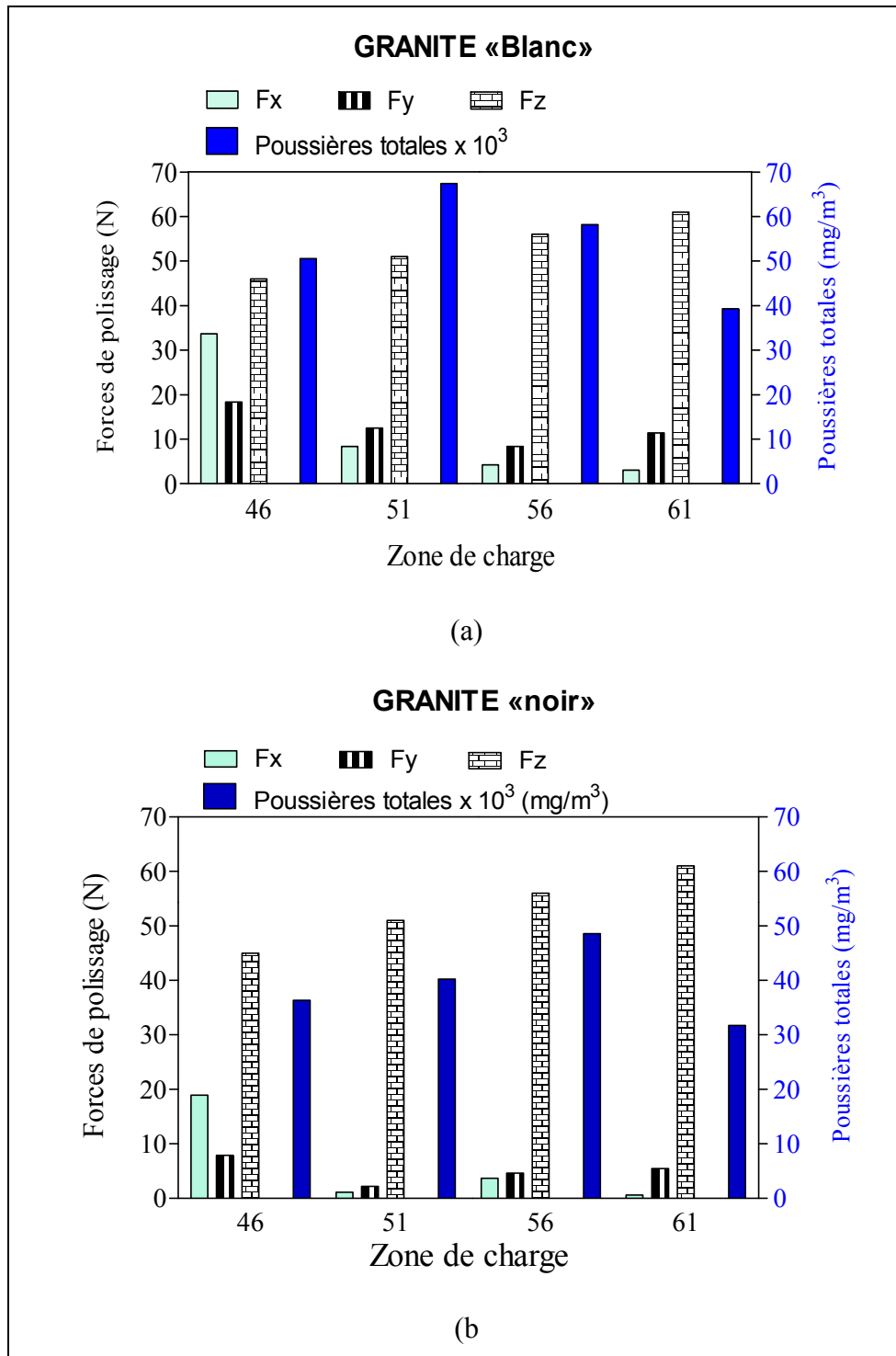


Figure 3.20 Graphiques des forces de polissage et des concentrations de poussières : (a) granite «noir»; (b) granite «blanc»;

3.2.2.2 L'influence de la géométrie de l'abrasif sur l'émission des poussières

Astahkov (2007) a montré que l'angle de coupe influençait systématiquement le mode de formation du copeau en usinage conventionnel des matériaux fragiles. Par ailleurs, Songmene et al (2008) a modélisé le contact entre l'outil de coupe et le matériau afin de délimiter les zones de génération de poussières ainsi que leur mode de formation. En s'inspirant de leurs deux méthodes, nous avons proposé une modélisation physique du contact entre l'abrasif et le granite en tenant compte des approches des deux auteurs. Il en résulte de ce que pour le granite qui appartient à la grande famille des matériaux fragiles, la génération est complexe et met en évidence l'action des abrasifs à angles de coupe positifs et les abrasifs à angle de coupe négatifs. La principale différence résidant dans les deux actions est le rapport entre l'effet de choc et l'effet de cisaillement. La surface d'attaque du grain abrasif est prépondérante dans la génération des poussières. Pour la génération à angle de coupe positif (Figure 3.21) ou à angle de coupe négatif (Figure 3.22), on distinguera l'action du cisaillement de l'abrasif; le choc et la friction par collision des grosses particules générés (sous l'action de l'onde de choc de l'abrasif et des aspérités du matériau, les grosses particules munies d'une énergie cinétique entre en collision entre elles et il se crée soit un éclatement ou un frottement de collision); le choc et la friction par collision des grosses particules sur la face de coupe de l'abrasif; la friction de la face de dépouille sur la pièce; l'action de la pression d'indentation (elle exerce une compression simple sur l'aspérité de surface jusqu'à la rupture de celle-ci); l'action de la face de dépouille sur la pièce.

3.2.3 Taux d'émission des poussières au cours du polissage des granites

Le taux d'émission des poussières au cours du polissage des granites est un paramètre important dans les études portant sur l'exposition aux aérosols émis par les procédés industriels. Ainsi, l'estimation de ce paramètre en fonction des facteurs de polissage permettra plus tard de réaliser l'étude sur la dispersion des poussières de polissage. Dans cette sous-section, il est présenté la comparaison des taux d'émission des granites, le modèle du taux d'émission, la comparaison des modèles de taux d'émission, et la détermination du coefficient d'émissivité spécifique.

3.2.3.1 Étude comparative du taux d'émission des nuances de granites

La comparaison des taux d'émission permet de ressortir le fait que les granites blanc ont un taux d'émission plus élevé que les granites noirs (Figure 3.23). Le maximum du taux d'émission pour les granites blancs est d'environ 30µg/s alors que celui des granites noirs est d'environ 20 µg/s. Ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle la nuance de granite en fonction de sa proportion en silice cristalline pourrait faire passer du simple au double l'exposition de l'ouvrier. Nous concluons en disant que la microstructure et la composition sont fondamentales pour l'estimation de l'exposition de l'ouvrier.

3.2.3.2 Les modèles de taux d'émission des poussières de granite sous des charges manuelles

Les essais réalisés ont permis de développer un modèle de régression permettant prédire le taux d'émission des poussières dans le cadre du polissage manuel et linéaire. Le modèle de régression du taux d'émission est exponentiel et se rapproche des modèles d'enlèvement de la matière trouvés dans la littérature. Le modèle de prédiction du taux d'émission (ξ_v) est exponentiel avec un intervalle de confiance de 95%, une corrélation respective de 95,30% pour le granite «noir».

Pour le granite «noir» le modèle est donné à l'équation 3.4 :

$$\xi_{v_GN} = 15 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{F_z - 48.5}{11.18} \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

Le modèle obtenu a une forme exponentielle se rapprochant des modèles d'enlèvement de la matière trouvés dans la littérature. Cette situation nous amène à comparer le taux d'émission expérimental, le modèle exponentiel du taux d'émission et le taux d'émission calculé à partir des modèles d'enlèvement de matière. Le modèle de prédiction du taux d'émission (ξ_v) est exponentiel avec un intervalle de confiance de 95%, une corrélation respective de 96,85% pour le granite «blanc». Le modèle est valable pour le polissage linéaire avec des charges manuelles variant de 46 à 61N.

Pour le granite «Blanc» le modèle est donné à l'équation 3.5 :

$$\xi_{v_GN} = 25 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{F_z - 48.5}{11.18} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

3.2.3.3 Les modèles d'enlèvement de la matière convertis en taux d'émission et comparaison avec le modèle proposé

Le taux d'émission des poussières fines PM2.5 (de granite) a été calculé à partir du taux d'enlèvement de la matière modélisé par plusieurs auteurs ayant mené des recherches en abrasion (Zum Gahr 1979 a, b, 1982), (Kruschov et Babichev, 1956), (Rabinowicz, 1966), (Kato et al, 1986). En effet leurs modèles d'enlèvement de la matière dépendent de la charge normale F_z , et d'autres paramètres d'abrasion (le facteur de forme de l'abrasif, la moyenne du demi-angle du sillon creusé par la pointe tranchante des abrasifs, la moyenne de profondeur du sillon des traces de passage de l'abrasif sur le matériau, le libre cours moyen entre deux inclusions ou microfissures, la ténacité du granite; la porosité du granite, la dureté du granite; la distance moyenne entre les particules abrasives, le coefficient de friction entre l'abrasif et le granite à polir et la pression critique en dessous de laquelle il y a pas d'enlèvement de la matière). Dans le cadre de cette comparaison, le taux d'émission des modèles a été estimé en exploitant la vitesse de coupe et le temps d'usinage utilisés dans nos essais. La comparaison montre que pour la plage de charges choisie et pour les conditions d'usinage utilisées, le modèle développé a même allure représentative que le modèle de Zum Gahr (1982). Les modèles de Kruschov et Babichev (1956), et de Rabinowicz (1966) semblent plus proches du modèle développé, mais elles divergent pour des charges proches de 61 N (Figure 3.24).

3.2.3.4 L'estimation du coefficient d'émissivité spécifique des granites

Nous définissons dans ce travail un paramètre nouveau susceptible de caractériser un matériau dans sa capacité à émettre de la poussière dans l'air ambiant dans des conditions de polissage proche de celle de nos essais. Ce coefficient d'émissivité spécifique K (N. $\mu\text{g/s}$) est le produit de la force normale appliquée (F_p) et de la masse de matière enlevée par unité de temps de polissage (m_p).

La force normale appliquée au niveau du contact de l'abrasif et du matériau est mesurée à l'aide d'une table dynamométrique et la matière enlevée est mesurée par une balance au microgramme. Le modèle d'émission des poussières est proportionnel au coefficient d'émissivité spécifique. Plus ce coefficient est élevé, plus le taux d'émission croît dans le temps de polissage. Au cours des essais réalisés pour le polissage du granite, nous avons estimé ce coefficient à $K=2200$ pour le granite blanc et 1300 pour le granite noir pour les conditions expérimentales donnés dans le cadre de cette recherche.

$$\xi_v = \frac{K}{11.18 \times \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{F_z - 48.5}{11.18} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

Où K est le coefficient d'émissivité spécifique (N. $\mu\text{g/s}$) ; F_z est la charge normale de polissage (N).

3.3 Conclusion partielle

Ce chapitre nous a permis de vérifier sur un diluteur à volume constant, un facteur de dilution permettant de recouvrir des concentrations réelles d'émission au cours du polissage du granite «blanc» et du granite «noir». Les concentrations diluées ont subi les réductions attendues et permis la mesure par le photomètre Dusttrak TSI#8530. Le facteur de dilution de 5 a été appliqué pour obtenir des concentrations réelles qui se diffèrent nettement selon la nuance de granite. Le granite «blanc» produit plus de poussières que le granite «noir» dans les conditions de coupe similaires. Les poussières totales atteignent les 15000 mg/m^3 d'où la nécessité de diluer pour protéger le dispositif de lecture optique des appareils de mesures. Un modèle exponentiel dépendant de la charge normale et du coefficient d'émissivité spécifique a été proposé pour prédire le taux d'émission massique pour les charges manuelles variables.

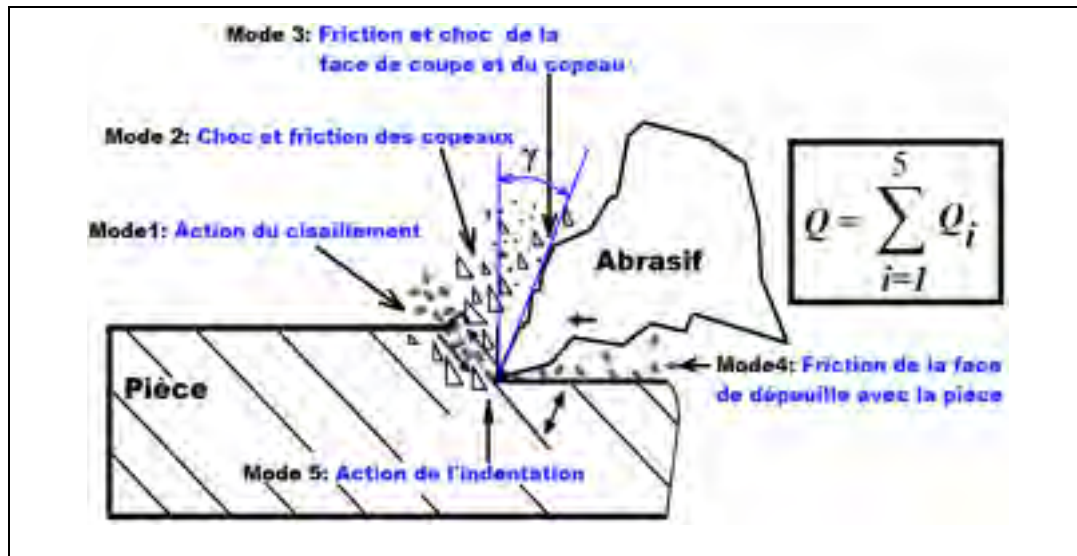


Figure 3.21 Modèle d'émission des poussières de granite pour les abrasifs à angle de coupe positif

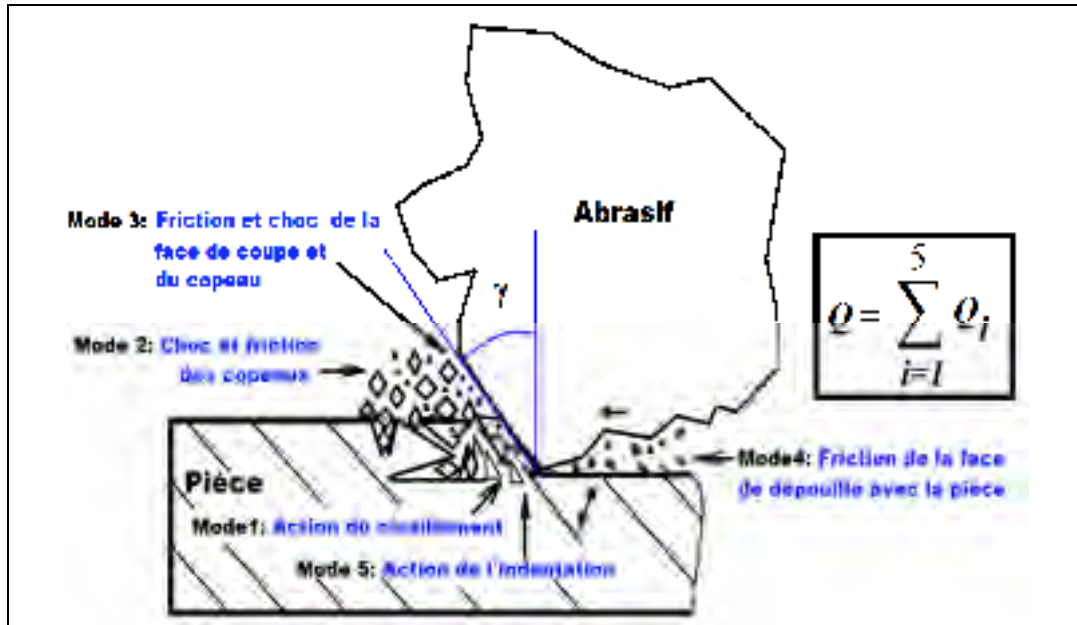


Figure 3.22 Modèle d'émission des poussières de granite pour les abrasifs à angle de coupe négatifs

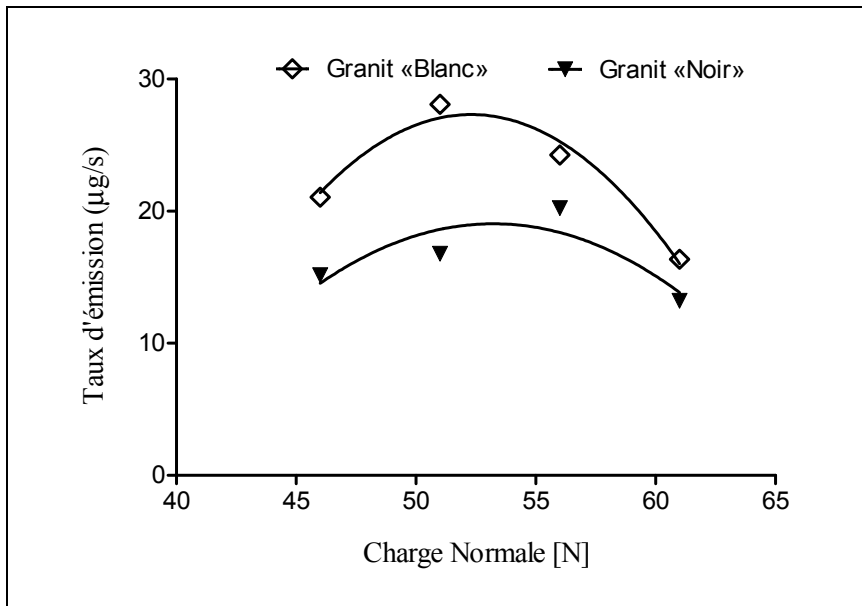


Figure 3.23 Modèles de régression de type exponentiel pour le taux d'émission des granites entre 46 et 61 N

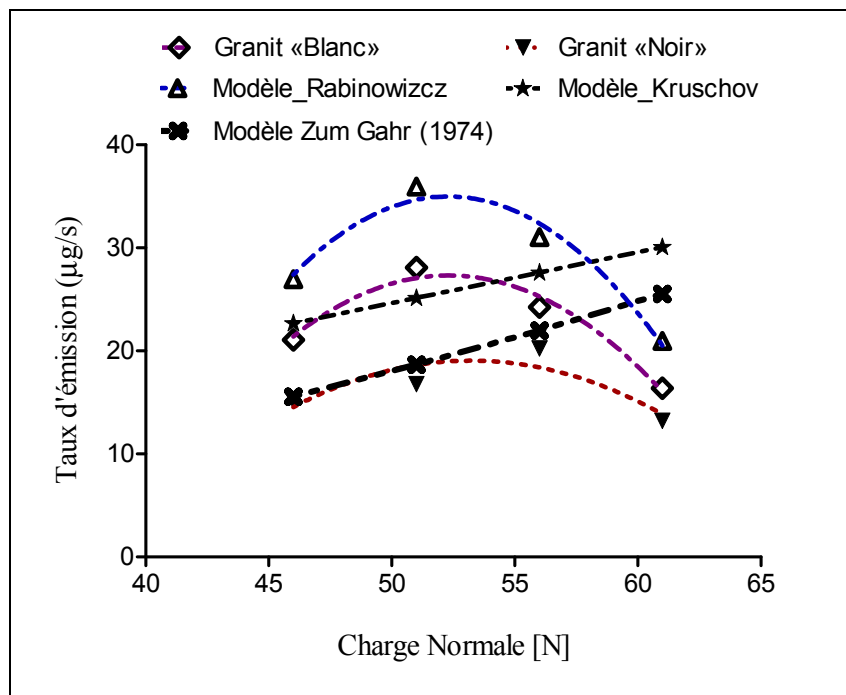


Figure 3.24 Comparaison des modèles d'estimation du taux d'émission de PM2.5 pour le granite «blanc» et le granite «noir»

CONCLUSION

Cette recherche avait pour objectif d'étudier la dilution des aérosols NaCl, d'y ressortir les meilleurs facteurs de dilution applicables aux procédés d'échantillonnage des poussières de polissage. L'étude des aérosols de NaCl nous a permis de montrer que l'amélioration du facteur de dilution passe par réduction du débit de l'air «pollué». Il a été montré que les débits d'air «pollué» de l'ordre du mGPL peuvent donner des facteurs de dilution de l'ordre de la centaine. Par ailleurs le comportement des aérosols de NaCl au cours de la dilution diffère de celui d'un gaz traceur comme le CO₂. Ce qui pourrait nous amener à conclure qu'il serait prudent d'utiliser les gaz traceurs dans les études portant sur les poussières de granites. Par ailleurs, cette étude a permis d'apporter une contribution notable sur la typologie des facteurs de dilution qui diffère selon qu'on l'estime à partir des débits ou bien des concentrations. Deux modèles de régression homographique et exponentielle ont été proposés pour prédire le facteur de dilution dans les situations d'échantillonnage adaptés aux aérosols de NaCl. L'application du facteur de dilution à l'échantillonnage des poussières PM_{2.5} a donné d'excellents résultats au niveau du fonctionnement du photomètre DUSTTRAK. Cela a permis de reconstituer le spectre des concentrations détérioré initialement par le débordement du calibre dues aux fortes concentrations dépassant la valeur de 400 mg /m³. Cette reconstitution des concentrations d'émissions à l'aide du facteur de dilution fournie par les essais de dilution des aérosols NaCl, a également permis d'estimer les poussières totales et le taux d'émission. Ce qui était pratiquement impossible avec les spectres bruts obtenus au cours du polissage de deux nuances de granit («blanc» et «noir»). La synthèse des résultats de reconstitution à travers le facteur de dilution des aérosols NaCl a montré clairement que dans les conditions de polissage définis dans cette recherche, le granite «blanc» (50% de Si) génère plus de poussières totales que le granite «noir» (10% de Si). Ce qui nous permettrait de recommander aux industries de polissage d'utiliser des moyens de protection adéquats pour protéger l'ouvrier au cours des opérations de finition. Le coefficient d'émissivité spécifique en poussières et le taux d'émission sera alors utilisé pour les études portant sur la dispersion.

RECOMMANDATIONS

Au terme de nos travaux sur la dilution des aérosols NaCl et du gaz traceur CO₂ pour leur applicabilité au processus d'échantillonnage par dilution des poussières de granite, nous proposons les recommandations suivantes:

- les aérosols de NaCl pourraient servir de substitution aux poussières de granites pour l'évaluation de la dilution en situation démontrant une certaine complexité ;
- La différenciation entre les différents facteurs de dilution dans le cadre de l'échantillonnage ;
- Le facteur de dilution «concentration» se présente comme meilleur paramètre d'évaluation de la dilution chez les aérosols alors que les deux types de facteur de dilution conviennent parfaitement au gaz traceur CO₂
- pour la dilution des aérosols, il est recommandé d'utiliser le modèle exponentiel du facteur de dilution pour une éventuelle utilisation pour l'échantillonnage, alors que pour le gaz traceur le modèle linéaire est adapté;
- le facteur de dilution «concentration» de 5 est exploitable au niveau industriel pour les situations de dilution de fortes concentrations de PM 2.5 (valeurs supérieures à 400 mg /m³) au cours du polissage réel sur machine-outil car il permet avec le diluteur considéré de reconstituer intégralement le signal temporel des concentrations de poussières;
- L'utilisation du facteur de dilution permet de différencier nettement le niveau d'émission des différentes nuances de granites ;
- les modèles proposés ne sont valides que pour les conditions expérimentales clairement définies dans les plans. Ils nécessitent des études plus approfondies pour une validation industrielle;
- les résultats obtenus au polissage réel n'ont pas été vérifiés au niveau de la répétabilité, ceci recommanderait des études statistiques reprenant plusieurs fois les essais.

ANNEXE I

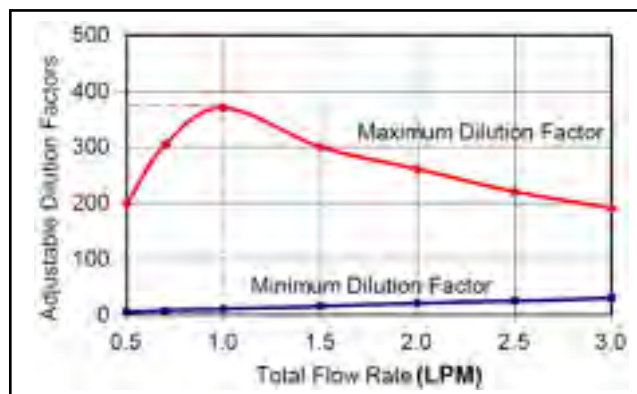
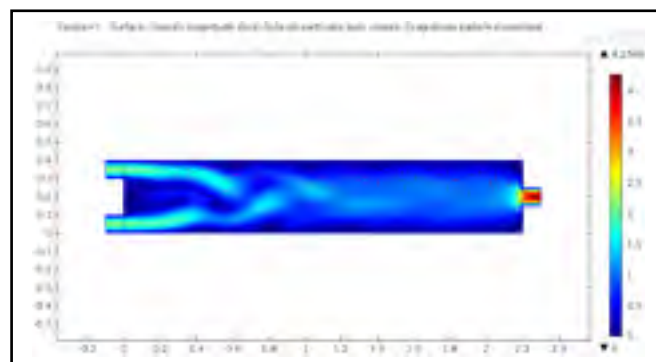
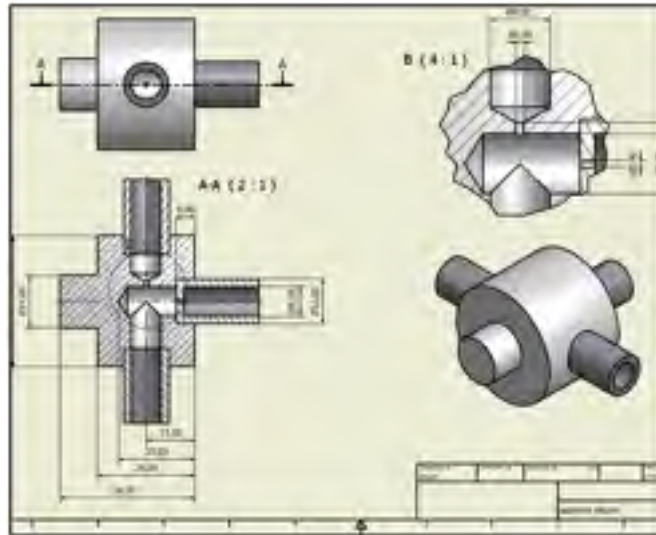
INVENTAIRE DES DILUTEURS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

Référence	Année	Matériau	Temp. °F	Diamètre Ø (inches)	Diamètre de mélange (inches)	Taille de la particule (nm)	Temps de résidence (s)	Nombre de Reynolds	Facteur de dilution
DYCOR [35]	2012	Acier inox., PVC	32-86	9	1.5 Ø	10 ³ -10 ⁴	/	/	/
Desante & al [36]	2011	Acier inox.	32- 662	/	/	/	/	/	20-200
Lee & al [37]	2011	Acier inox	/	/	/	2.5 - 1000 ≤2500	20	/	35
Wilbur & al [38]	2010	PVC	/	/	/	/	/	/	2;10;50
Schmidt [39]	2010	/	/	/	/	/	/	/	/
Giechaskiel & al [40]	2009	/	/	/	/	30-100	/	/	1-270
Virkkula & al [41]	2009	/	/	/	/	/	/	/	/
Miettinen & al [42]	2009	/	73.4- 95	/	/	/	/	/	6-32
Tornatore & al [43]	2008	/	/	/	/	50-70	/	/	/
Franka & al [44]	2008	/	/	/	/	≤2	/	/	100
Lee & al [45]	2008	Acier inox	/	/	/	≤2500	/	/	/
Knibbs [46]	2007	/	/	/	/	≤2500	/	/	/
Armas & al [47]	2007	/	/	/	/	/	/	/	100
Robinson & al [48]	2006	/	/	/	/	3-2500	/	/	15; 75
Donahue & al [49]	2006	/	/	/	/	≤2500	/	/	1000- 4000
Schlatter [50]	2006	/	/	/	/	71; 95;175	/	/	/
Ouf [51]	2006	/	572	/	/	50-100	/	/	10-100
Krüger & al [52]	2005	Acier inox	/	2.75	1.5 Ø	≤2500	/	/	10
O' Connor [64]	2003	Acier inox ; Teflon	/	/	/	≤2500	/	/	30
Lee & al [65]	2003	Acier inox.	/	9	40 Ø	≤2500	40	13,000	25-80
Lee & al [66]	2002	Aluminum; PTFE	/	/	/	/	40-80	/	≥100
Lipky & al [67]	2002	Acier inox	/	14	15 Ø	≤2500	0-720	/	20-200

Référence	Année	Matériau	Temp. °F	Diamètre Ø (inches)	Diamètre de mélange (inches)	Taille de la particule (nm)	Temps de résidence (s)	Nombre de Reynolds	Facteur de dilution
Myer & Logan [68]	2002	Acier inox , teflon	/	10	4 Ø	≤2500	<1	3,000- 13,000	40
Massling & al[69]	2001	/	/	/	/	≤2500	/	/	/
Mikkanen & al[70,71]	2001	Teflon	/	/	/	≤2500; ≤10 ⁴	5-40	4,000	8-40
TOPAS[72]	2000	Acier inox, PVC	/	/	/	≤2500	/	/	10;100; dynamic
GRIMM[73]	2000	Acier inox, teflon	/	/	/	≤2500	/	/	10
GRIMM[74]	2000	Acier inox,teflon	32- 392	/	/	10-1000	/	/	15-300
Morawska & al[75]	1999	/	/	/	/	≤2500	/	/	/
Matter & al[76]	1999	/	126- 302	/	/	≤2500	/		10 - 10000
Liddament & al[77]	1998	/	/	/	/	≤2500	/	/	Formula
Kittelson & al[78]	1998	/	/	/	/	5×10 ³ - 10 ⁹	0.5-2; 0.5-3		3-20; 5-50; 5-1000
Hüglin & al[79]	1997	/	/	/	/	≤2500	/	/	30-1000
Blattner[80]	1996	/	/	/	/	≤2500	/	/	250
Linder & Wall[81]	1996	Teflon; acier inox	/	6	12 Ø	≤2500	5	10,000	10-50
URG[82]	1996	Teflon; verre; Aluminium	/	3.5	80 Ø	≤2500	40	/	20-40
Hildemann & al[83]	1989	Acier inox , teflon	/	15	10 Ø	≤2500	2 -180	10,000	40; 25 – 100
Houck & al[84]	1982	PVC	/	10	29 Ø	≤2500	1 -3	11,000 - 23,000	≥20
Smith & al[85]	1982	Plexiglas, Teflon	/	21	6 Ø	≤2500	6.2	2,800	25
Carpenter[86]	1978	Acier inox	/	30	12 -15 Ø	≤2500	1.3	47,000	8 – 25 & ≥100
Foster & al[87]	1972	Acier inox , PVC, Polyacrylate	/	8. 5-23	7 -28 Ø	≤2500	0.8-6.7	29,000 - 130,000	6 – 25

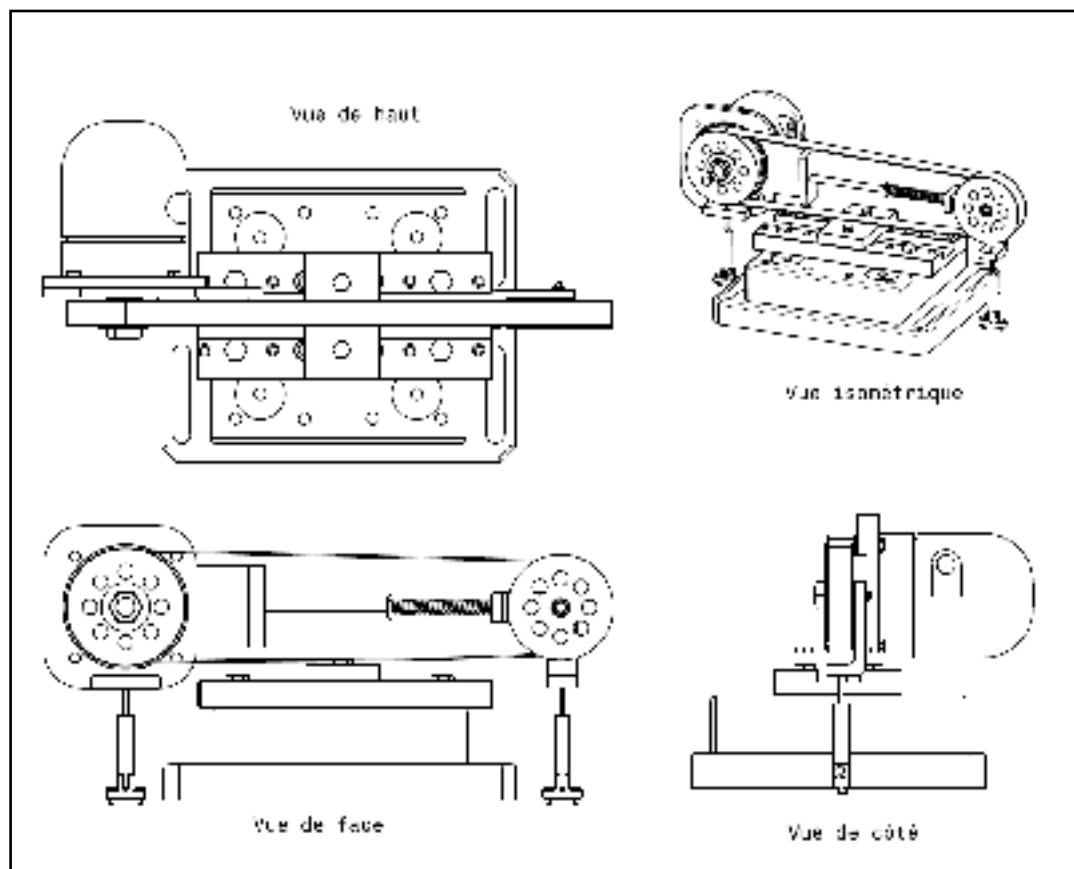
ANNEXE II

DILUTEUR À INJECTION, SIMULATION ET COURBE DE DILUTION



ANNEXE III

BANC D'ESSAI ET POLISSEUSE MAKITA



ANNEXE IV

MODÈLES D'ÉMISSION DE POUSSIÈRES D'USINAGE

Références	Matériau	Modèle d'émission des poussières	Facteurs
Songmene et al (2008)	6061-T6, A356, AZ91E, Laiton70-30	$P_c = A.(V_c)^p$ $P_c = K.(V_w)^\lambda$	A, K : Constantes dépendant du matériau p, λ: Constantes liés resp. à la ductilité du matériau, et à la vitesse de coupe. V_c: Vitesse de coupe (m/min) V_w: Vitesse d'avance (mm/rev) P_c: Concentration totale (mg/m³)
Zaghibani et al (2009)	6061T6	$Du = \frac{A}{(V_c)^m} \exp \left[\frac{-E_a}{\left(1 - \frac{\sin \alpha_n}{C_h}\right) (\tan \phi) V_c \tau_{AB}} \right]$	A, m: Constantes V_c: Vitesse de coupe (m/min) E_a: Énergie d'amorce (J) α_n: Angle de coupe (rad) ϕ: Angle de cisaillement (rad) τ_{AB}: Contrainte de cisaillement en zone primaire (Mpa)
Khettabi et al (2007, 2009)	Acier1018, Acier4140, 6061T6	$D_u = \frac{b}{(V_c)^c \exp \left(\frac{cV_0}{V_c} \right)}$ $Du = A \times \frac{\beta_{max} - \beta}{\beta_c} \times R_s \times \eta_s \left(\frac{V_0}{V_c} \right)^\delta \exp \left(\frac{-E_a}{\tan \phi (1 - C_h \sin \alpha) V_c \frac{F_{sh}}{bV_w}} \right)$	b, c: Constantes V_c: Vitesse de coupe (m/min) V_0: Vitesse de coupe à l'émission maximale de poussières (m/min) A, b: Constantes δ: Contante de productivité des poussières $\beta, \beta_c, \beta_{max}$: Coefficient de segmentation du copeau (normal, critique et maximal) η_s: Densité de segmentation du copeau R_a: Rugosité arithmétique (µm) V_c: Vitesse de coupe (m/min) V_w: Vitesse d'avance (mm/rev) V_0: Vitesse de coupe à l'émission maximale de poussières (m/min) C_h: Compressibilité du copeau F_{sh}: Force de cisaillement (N)

ANNEXE V

MODÈLES DE TAUX D'ENLÈVEMENT DE LA MATIÈRE

Réf.	Mat.	Modèle d'enlèvement de la matière	Facteurs	Modèle
Kruschov et Babichev (1956)	acier	$\frac{\Delta V}{\Delta L} = \frac{F_N \tan(\alpha)}{\pi H}$	F_N : Force normale appliquée α : Angle au sommet du sillon H : Dureté du matériau ΔV : Perte de volume de matière ΔL : Déplacement de l'indenteur	Linéaire/ F_N
Rabinowicz (1966)	acier	$\dot{w} = \frac{P}{f_f H \tan \alpha}$	P : Pression normale appliquée α : Angle au sommet du sillon f_f : Coefficient de forme de l'abrasif	Linéaire/ P
Zum Gahr (1979a)	fragile	$\dot{w} = 12.13 \cdot \frac{h \cdot d}{\lambda^2} \cdot \frac{P^{\frac{3}{2}} \cdot D \cdot M^2 \cdot \sqrt{H}}{K_c^2 H \sin 2\alpha} \cdot \log\left(\frac{P}{P_c}\right)$	P : Pression normale appliquée P_c : Pression normale critique K_c : Ténacité du matériau	Logarithmique et exponentiel/ P
Zum Gahr (1979b)	fragile	$\dot{w} = \frac{P}{f_f H \tan \alpha} + 12.13 \cdot \frac{h \cdot d}{\lambda^2} \cdot \frac{P^{\frac{3}{2}} \cdot D \cdot M^2 \cdot \sqrt{H}}{K_c^2 H \sin 2\alpha} \cdot \log\left(\frac{P}{P_c}\right)$	P : Pression normale appliquée P_c : Pression normale critique K_c : Ténacité du matériau	Linéaire, logarithmique et exponentiel/ P
Kato et al (1986)	fragile	$\Delta V = \alpha_c \beta_c \frac{F_N \Delta L}{C H_v}$	F_N : Force normale appliquée α_c , β_c et C : Coefficients expérimentaux H_v : Dureté du matériau	Linéaire/ F_N
Tönshoff et al. (1992)	acier	$\dot{w} = C \left(\frac{1}{q} \right)^a P_p^b R_{eq}^c$	P_p : Puissance de polissage a , b , c : Coefficients expérimentaux R_{eq} : Rayon équivalent du contact C : Coefficient de pairage (abrasif-pièce) q : Ratio de la vitesse de coupe (V_c) sur la vitesse d'avance (V_w)	Exponentiel/ P_p
Kim et al (1996)	fragile	$\dot{w} = \alpha \left(\frac{\sigma \sqrt{(1 + \mu^2) c}}{K_{IC}} \right)^\beta$	σ : Contrainte ou pression sur l'abrasif μ : Coefficient de frottement du matériau α , β et c : Coefficients expérimentaux K_{IC} : Ténacité du matériau	Exponentiel/ σ
Jenkins et al. (1997)	Acier	$\dot{w} = K_p (F_N - F_{N0}) V_C$	F_N : Force normale appliquée au cours de l'essai F_{N0} : Force normale seuil K_p : Coefficient dépendant de la friction et de l'énergie spécifique V_C : Vitesse de coupe	Linéaire/ F_N

BIBLIOGRAPHIE

- Abdul-Khalek, I.S.; Kittelson,D.B; and Brear, F., (1999). The Influence of dilution conditions on diesel exhaust particle size distribution measurements, *Paper 98011142, Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA.
- Astakhov V.P.; Shvets, S.; and Osman, MOM., (1997). The bending moment as cause of ship formation, *Int. J. of Manu, Sci. and Tech.*, Vol2N°6-2, pp. 53-60.
- Baumgard, K.J.; and Johnson,J.H.,(1996) The Effect of Fuel and Engine Design on Diesel Exhaust Particle Size Distributions, *Paper 960131, SAE International*, Warrendale, PA..
- Binet, A.; et Vaschide, N., (1897). La mesure de la force musculaire chez les jeunes gens. La force de pression, de la main, la traction, la corde lisse, le saut, *L'année psychologique*. Vol. 4. pp. 173-199.
- Brockhorn, H.; (1994). Soot Formation in Combustion, Mechanisms, and Models, *Springer Series in Chemical Physics, Springer-Verlag*: Berlin 1994, Vol. 59.
- Brockmann,J.E.; Liu, B.Y.H. and McMurry, P. H, (1984). A sample extraction diluter for ultrafine aerosol sampling, *Aerosol Science and Technology*, Vol.3: 4, pp.441-451
- CERP; (2004). Method comparison of dilution tunnel sampling system and impinger method, 201A/202, *US Army Contract DAAE30-02-C-1095*, Report, McClellan, USA, 75p.
- Chalfoun, J., (2005). Prédiction des efforts musculaires dans le système main avant-bras : Modélisation, simulation, optimisation et validation, Thèse de Doctorat de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en Yvelines, France, 166p.
- Chen, S.C.; Tsai, C.J.; Wu, C.H.; Pui, D.Y.H.; Onischuk, A.A.; Karasev, V.V.(2007). Particle loss in a critical orifice. *Journal of Aerosol Science*, Vol.38:9 ,pp.935-949.

- Chevalier, A., (2003). Guide du dessinateur industriel. *Hachette éducation*, Paris, 335p.
- Collins, A.M.; (2010). Ultrafine particle loss in aerosol diluter, Master thesis *University of Minnesota, USA*, 127p.
- Debongnie, J.F.; (2006), Usinage, *CÉFAL*, Liège, 155p.
- DEKATI; (2003). DEKATI ejector diluter in exhaust measurements V2.1, *Dekati Ltd. Osuusmyllynkatu 13 FIN-33700 Tampere, Finland*, 5p. www.dekati.fi
- Delattre, P.; and Friedlander, S. K. (1978). Aerosol coagulation and diffusion in a turbulent jet, *Ind. Eng. Chem. Fundam*, Vol.17: pp.189-194.
- Desantes, J.M.; Bermudez, V.; Molina, S.; and Linares, W.G.,(2011). Methodology for measuring exhaust aerosol size distributions using an engine test under transient operating conditions, *Journal of Meas. Sci. Technol.*, Vol.2:115101, pp.1-14.
- El-Hofy, H.; (2007). Fundamental of machining processes-Concentration and non conventional processes, *Taylor & Francis*, London, New-york, USA, 452p.
- Forest, J.; Tremblay, C. (2007) Bilan de l'étude environnementale de l'exposition au quartz chez certains travailleurs du secteur BTP. Direction de santé publique, Agence de la santé et des services sociaux de Montréal, Montréal, QC
- Fuchs, N. A.; and Sutugin, A.G. (1965). Coagulation rate of highly dispersed aerosols, *Journal of Colloid Science*, Vol.20, pp.492-500.
- Giechaskiel, B.; Carriero, M.; Martini, G., Krasenbrink, A., and Scheder, D., (2009a). Calibration and validation of various commercial particle number measurement system, *SAE International*, Vol 1, N°1115, 16p.
- Giechaskiel, B.; Lusueur, D.; Müller, R., and Krasenbrink, A., (2009b). Prototype dilution system for on-board measurements compliant with the legislation and the particle measurement programme (PMP), *Joint Research Centre of European Commission*, IEASTAQU, EUR 23932 EN, 28p.

- Giechaskiel, B.; Cresnoverh, M., Jorgl, H., and Bergmann, A. (2010). Calibration and accuracy of a particle number measurement system, *J. of Meas. Sci. Technol.* Vol.21: 045102, doi:10.1088/0957-0233/21/4/045102, 13p.
- Gormley, P.G.; Kennedy, M., (1949). Diffusion from a stream following through a cylindrical tube. *Proceedings of Royal Irish Academy*, Vol.52, pp.163–169.
- Gulder, O.L.; (1999). Soot Particulate Formation in Combustion, *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, Vol.23, pp. 225-240.
- Hildemann L.M.; Cass G.R., Markowski, G.R, (1989). A dilution stack sampler for collection of organic emissions: design, characterization and field tests, *J. of Aerosol Science and Technology*, Vol10:1, pp193-204
- Hinds W.C; (1999). Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles, *Wiley Interscience*, US, 483p.
- Kato, k.; Hokkirigawa, k., and Kayaba T., (1986) Three dimensional shape effect on abrasive wear – *Int. Journal of tribology*. Vol. 108, pp. 346–351.
- Kelly, K.E.; Sarofim, A.F. ; Lighty, J.S.; Wagner, D.A.; Arnott, W.P. ; Rogers, C.F.; Zielinska, B.; and Prather, K.A. (2005). User guide for characterizing particulate matter- evaluation of several real-time methods, *University of Utah, Desert Research Institute and Univeristy of California San Diego*, USA, 44p. <http://ds.heavyoil.utah.edu/dspace/bitstream/123456789/10315/1/UserGuideForCharacterizingParticulateMatter.pdf>
- Khettabi, R.; Songmene, V.; Zaghbani, I., and Masounave, J., (2007). Modeling of particle emission during dry orthogonal cutting, *Int. Journal of material engineering and performance*, Submitted on august 2008, revised on august 2009.
- Khettabi, R.; Songmene, V.; and Masounave, J., (2009). The Effect of Tool Geometry and Cutting Parameters on Dust Emission During Dry Machining, *Journal of material and process. technol.*, Vol.194 (1–3):pp.100–109.

- Kittelson, D. B.; Watts, W. F., & Johnson, J. (2002). Diesel aerosol sampling methodology- CRC E-43: Final report. *University of Minnesota*, Report for the Coordinating Research Council, 19p.
- Kittelson, D.B.; Johnson, J.; Watts, W. ; Wei, Q. ; Drayton, M. ; and Paulsen, D., (2000) Diesel Aerosol Sampling in the Atmosphere, *Paper 2212, Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA.
- Knibbs, L.D.; De Dear, R.J; Morawska, L.; and Coote P.M., (2007). A simple and inexpensive dilution system for the TSI 3007 Condensation Particle Counter, *Journal of Atmospheric Environment*, Vol.41:21, pp.4553-4557.
- Kouam, J.; Songmene, V.; Djebara, A., and Khettabi, R., (2012). Effect of Friction Testing of Metals on Particle Emission, *Int. Journal of Mat. Eng. and performance*, Vol 21:6, pp.965-972.
- Khrushov M.M.; and Babichev M.A, (1956).Investigation on the wear of metals and alloys during friction against an abrasive surface, *Int. J. of Frict. Wear Mach.*, Vol.11, pp 5-18.
- Lazure, L.; Cloutier, Y.; et Gravel, R. (2004). Rapport : Mémento sur l'utilisation des rotamètres de marque Gilmont et Allegro pour l'évaluation des débits d'alimentation des pompes à air ambiant, *Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail*, R371, 70p. <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/pubirsst/r-371.pdf>.
- Lipsky, E.; Stanier, C.O.; Pandis, S.N.; Robinson, A.L., (2002). Effects of sampling conditions on the size distribution of fine particulate matter emitted from a pilot-scale pulverized-coal combustor, *Energy & Fuels*, Vol.16, pp302-310.
- Marinescu, I.D.; Brian, R.W.; Dimitrov, B.; Inasaki, I.,(2004), Tribology of abrasive process: Introduction, *Williams Andrew Publishing Inc.*, ISBN: 0-8155-1490-5, pp.1-11

- Maricq, M.M.; Chase, R.E.; Xu, N. A Comparison of Tailpipe, Dilution Tunnel, and Wind Tunnel Data in Measuring Motor Vehicle PM, *J. Air Waste & Man. Assoc.* 51 2001 1529-1537.
- Noble, C.A., Lawless, P.A., Rhodes, C.E., (2005). A sampling approach for evaluating particle loss during continuous field measurements of particulate matter, *Particle & Particle System Characterization*, Vol.22, pp.99–106.
- Piette, A; Gomes-Ferreira, L.; et Malchaire, J., (1995). Exposition aux vibrations main-bras des meuleuses-influence de la posture et des efforts, *Cahier de médecine du travail*, Vol 12. N°1. pp 47-53.
- Rader, D.J., (1990). Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 21, 161-168.
- Rabinowicz, E., (1966). Friction and wear of material, *John Wiley and sons*, London.
- Siegesmund, S.; and Dürrast, H., (2011). Physical and Mechanical Properties of Rocks Stone in Architecture, pp. 97-225
- Songmene, V.; Balout, B.; Masounave, J., (2008). Clean machining: Experimental investigation on particle formation Part I: Influence of machining parameters and chip formation, *Int. J. Environ. Conscious. Des. Manuf. (ECDM)*, 14 (1): pp.1–16.
- TSI; (2014a). Model 3302a diluter instruction manual. Retrieved Feb 20, 2014, from http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Manuals/1933786b-3302A.pdf
- TSI; (2014b). Model 3080 SMPS instruction manual. Retrieved Feb 20, 2014, from http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheet/s/3938%20SMPS_US_5001531_RevA_Web.pdf
- Weiss, G., (1992). Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter, *Münchner Geowiss Abh*, B 9, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich.

- WHO., (1984). Évaluation de l'exposition aux particules atmosphériques dans les ambiances de travail, *World Health Organization*, Genève, WHO N°80, ISBN 9242700800, 75p.
- Xie, J., and Tamaki, J., (2007) Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.186 pp.253–258.
- Yilmaz, N.G., (2013). Particle size distribution and shape characterization of the chips produced during granite machining in relation to process forces and specific energy, *Int. J. of Particulate Sc. And Tech.*, N° 31:3, pp 277-286.
- Yoong, J.Y., Cheesver, S., Jennings S.G., and O'Dowd, C.D., (2005). Performance of a venture dilution chamber for sampling 3-20nm particle, *Journal of Aerosol science*, 36: pp.535-540.
- Zaghbani I.; Songmene, V.; and Khettabi R., (2009). Fine and ultrafine particle characterization and modeling in high-speed milling of 6061-T6 aluminum alloy, *ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG)*, 18(1): pp.38-48.
- Zum Gahr, K.H., (1979a). Abrasive wear on metallic material, *Metallurgical aspects of wear*. pp. 73-104.
- Zum Gahr K.H., (1979b). How microstructure affects abrasive wear resistance. *Int J. of Metal Progress*, Vol. 6, pp 46- 52.
- Zum Gahr K.H., (1982). Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals. *Int J. of Wear*, Vol. 74, p 353- 373